

**Universidad Zamorano**  
**Departamento de Agroindustria Alimentaria**  
**Ingeniería en Agroindustria Alimentaria**



Proyecto Especial de Graduación  
**Desarrollo de una película a base de biopolímeros y aplicación de  
nanotecnología para el empaque de lomo de cerdo (*Longissimus dorsi*)**

Estudiantes

Fermel Abdías Quirán Sián  
María Sofía Delgado Ramírez

Asesores

Adela Acosta, D. Sc.  
Luis Maldonado, Ph.D.

Honduras, septiembre 2025

**Autoridades**

**KEITH L. ANDREWS**

Rector i.a.

**ANA M. MAIER ACOSTA**

Vicepresidenta y Decana Académica

**ADELA M. ACOSTA MARCHETTI**

Directora Departamento de Agroindustria Alimentaria

**JULIO NAVARRO**

Secretario General

## Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras .....	6
Índice de Anexos.....	7
Resumen .....	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y Métodos.....	13
Ubicación de la Investigación.....	13
Descripción del Estudio.....	13
Fase I: Desarrollo y Caracterización de las Biopelículas.....	13
Fase II: Evaluación de las Propiedades Físicoquímicas y Microbiológicas en Lomo de Cerdo.....	19
Fase III: Aceptación, Preferencia y Disposición a Pagar por el Consumidor .....	23
Diseño Experimental .....	24
Fase I: Desarrollo y Caracterización de las Biopelículas.....	24
Fase II: Evaluación de las propiedades físicoquímicas y microbiológicas en lomo de cerdo.....	25
Fase III: Aceptación, Preferencia y Disposición a Pagar por el Consumidor .....	26
Análisis Estadístico .....	27
Resultados y Discusión.....	28
Caracterización de las Biopelículas .....	28
Fuerza de Perforación, Deformación Lineal y Módulo de Young .....	28
Solubilidad, Permeabilidad al Vapor de Agua y Biodegradabilidad en Suelo .....	30
Efecto en las propiedades de lomo de cerdo ( <i>Longissimus dorsi</i> ).....	32
Pérdida por Purga .....	32
Efecto en el pH.....	36

	4
Fuerza de corte .....	39
Diferencia de color .....	42
Bacterias Aerobias Mesófilas .....	45
Aceptación por el consumidor .....	47
Disposición a pagar .....	51
Conclusiones .....	53
Recomendaciones .....	54
Referencias.....	55
Anexos.....	61

## Índice de Cuadros

Cuadro 1 Formulación para elaboración de películas según Rodriguez y Andino (2022). .....	13
Cuadro 2 Descripción de los tratamientos evaluados en la caracterización de las biopelículas. ....	14
Cuadro 3 Descripción de los tratamientos evaluados .....	20
Cuadro 4 Caracterización de la fuerza de perforación, deformación lineal y módulo de Young de los biopolímeros de empaque. ....	30
Cuadro 5 Caracterización de la solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y biodegradabilidad de los biopolímeros de empaque. ....	32
Cuadro 6 Efecto de los sistemas de empaque sobre el porcentaje de purga en lomos de cerdos (Longissimus dorsi) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C. ....	35
Cuadro 7 Efecto de los sistemas de empaque sobre el pH en lomos de cerdos (Longissimus dorsi) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C. ....	38
Cuadro 8 Efecto de los sistemas de empaque sobre la fuerza de corte (Newtons) en lomos de cerdos (Longissimus dorsi) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C. ....	41
Cuadro 9 Efecto de los sistemas de empaque sobre la diferencia de color ( $\Delta E^*_{Lab}$ ) en lomos de cerdos (Longissimus dorsi) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C. ....	44
Cuadro 10 Efecto de los sistemas de empaque sobre la carga de bacterias mesófilas aerobios (Log (UFC/g) en lomos de cerdos (Longissimus dorsi) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C. ....	46
Cuadro 11 Aceptación de los empaques por clientes externos del puesto de venta de la Universidad Zamorano. ....	50
Cuadro 12 Prueba de Basker y Kramer para la preferencia por ranking de los empaques por clientes externos del puesto de ventas de la Universidad Zamorano. ....	50

## Índice de Figuras

Figura 1 Sistemas de empaques evaluados .....	21
Figura 2 Comportamiento del porcentaje de purga en lomos de cerdos ( <i>Longissimus dorsi</i> ) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C. ....	35
Figura 3 Comportamiento del porcentaje del pH en lomos de cerdos ( <i>Longissimus dorsi</i> ) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.....	38
Figura 4 Comportamiento del pH en lomos de cerdos ( <i>Longissimus dorsi</i> ) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.....	42
Figura 5 Color en lomos de cerdos ( <i>Longissimus dorsi</i> ) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C...44	44
Figura 6 Comportamiento de la carga de bacterias mesófilas aerobios (Log (UFC/g)) en lomos de cerdos ( <i>Longissimus dorsi</i> ) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.....	47
Figura 7 Sexo de los clientes externos encuestados en el puesto de ventas de la Universidad Zamorano. ....	48
Figura 8 Frecuencia de compra de los clientes externos encuestados en el puesto de ventas de la Universidad Zamorano.....	48
Figura 9 Cantidad de carne comprada de los clientes externos encuestados en el puesto de ventas de la Universidad Zamorano. ....	49
Figura 10 Características percibidas por los consumidores en el tratamiento 2(Biopolímero de quitosano, gelatina tipo B y nanopartículas de plata). ....	51
Figura 11. Disponibilidad a pagar por empaques biodegradables, amigables con el ambiente y uso de nanotecnología de los clientes externos encuestados del puesto de ventas de la Universidad Zamorano.....	52

### Índice de Anexos

Anexo A Encuesta aplicada para el sensorial visual de empaques en el puesto de ventas Zamorano	61
Anexo B Costos de producción de las biopelículas .....	66

## Resumen

La creciente necesidad de envases sostenibles en la industria cárnica ha impulsado la investigación sobre películas biodegradables para preservar la calidad y reducir el impacto ambiental. Este estudio se llevó a cabo en tres fases. En la Fase I, se caracterizaron las películas bajo un Diseño Completamente al Azar (DCA) con tres tratamientos: polietileno de baja densidad (Control), biopelícula de quitosano y gelatina tipo B (T1), y biopelícula de quitosano, gelatina tipo B y nanopartículas de plata (T2), todos con tres repeticiones. La Fase II evaluó el pH, color, purga, fuerza de corte y bacterias mesófilas en lomos de cerdo usando un arreglo factorial de 3x3, películas y días de almacenamiento (1, 5 y 10 días), sumando 27 unidades experimentales. La Fase III analizó la aceptabilidad y la disposición a pagar con 38 consumidores adultos utilizando un análisis descriptivo transversal y la disposición a pagar con una prueba de ordenamiento. El análisis estadístico incluyó un ANDEVA y prueba de Duncan para las Fases I y un ANDEVA y prueba Lmeans para la fase II, y la prueba de Basker-Kramer para la de preferencia. Los resultados mostraron que las biopelículas alcanzaron una biodegradabilidad superior al 80%, en contraste con el polietileno. El biopolímero con nanopartículas de plata demostró un mejor desempeño en la conservación de lomos de cerdo, aunque afectó negativamente la estabilidad del color. El biopolímero T1 destacó por una mayor resistencia mecánica. Las encuestas revelaron una alta aceptación y disposición positiva a pagar, resaltando la sostenibilidad y la percepción de frescura como atributos clave.

*Palabras clave:* actividad antimicrobiana, gelatina, quitosano, sostenibilidad ambiental, vida útil.

### **Abstract**

The growing need for sustainable packaging in the meat industry has driven research into biodegradable films to preserve quality and reduce environmental impact. This study was carried out in three phases. In Phase I, the films were characterized under a Completely Randomized Design (DCA) with three treatments: low-density polyethylene (Control), chitosan and type B gelatin biofilm (T1), and chitosan, type B gelatin and silver nanoparticles (T2) biofilm, all with three repetitions. Phase II evaluated pH, color, purging, shear strength, and mesophilic bacteria in pig loins using a factorial arrangement of 3x3, films, and storage days (1, 5, and 10 days), totaling 27 experimental units. Phase III analyzed acceptability and willingness to pay with 38 adult consumers using a cross-sectional descriptive analysis and willingness to pay with a proof of ordering. The statistical analysis included an ANDEVA and Duncan test for Phases I, an ANDEVA and Lmeans test for Phase II, and the Basker-Kramer test for the preference. The results showed that biofilms achieved biodegradability of more than 80%, in contrast to polyethylene. The biopolymer with silver nanoparticles showed a better performance in the preservation of pork loins, although it negatively affected the color stability. The T1 biopolymer stood out for its greater mechanical resistance. The surveys revealed high acceptance and positive willingness to pay, highlighting sustainability and the perception of freshness as key attributes.

*Keywords:* antimicrobial activity, consumer perception, food safety, shelf-life, sustainability.

## Introducción

La industria cárnica global se enfrenta a diversos retos, entre ellos satisfacer la creciente demanda de proteína animal de alta calidad mientras mitiga el impacto ambiental generado por sus operaciones, particularmente el asociado a los materiales de empaque. Los envases de plásticos convencionales derivados del petróleo, predominantemente poliolefinas como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), han sido la piedra angular de la conservación y distribución de productos perecederos como la carne gracias a sus excelentes propiedades de barrera, versatilidad y bajo costo (Geueke et al., 2018). No obstante, su persistencia en el ambiente, su contribución a la contaminación por microplásticos y su lenta tasa de degradación los han situado en el centro de un creciente investigación regulatoria y social (Schmidt y Laner, 2023). La búsqueda de alternativas de envasado sostenibles, eficaces y seguras se ha convertido, por tanto, en un prioridad científica e industrial.

En este contexto, los biopolímeros emergen como la alternativa más prometedora. Materiales como el quitosano y la gelatina tipo B son biodegradables, biocompatibles y proceden de fuentes renovables, a menudo de coproductos de otras industrias, lo que los enmarca dentro de los principios de la economía circular (Flórez et al., 2022). El quitosano, un polisacárido catiónico obtenido de la desacetilación de la quitina de crustáceos, posee una inherente actividad antimicrobiana contra una amplia gama de patógenos y alterantes alimentarios (Haghighi et al., 2019). Por su parte, la gelatina tipo B, derivada de la hidrólisis del colágeno, forma películas con excelentes propiedades de barrera al oxígeno y propiedades mecánicas maleables (Gómez-Estaca et al., 2011). La combinación de estos dos biopolímeros puede generar films sinérgicos donde las propiedades individuales se complementan, mejorando la matriz polimérica resultante.

No obstante, una limitación crítica de la mayoría de los biopolímeros es su inherente hidrofiliidad, que conduce a una elevada permeabilidad al vapor de agua (PVA) y, en consecuencia, a una menor eficacia en la protección de productos con alta actividad de agua, como la carne fresca (Haghighi, Licciardello, et al., 2020). Para superar esta desventaja y añadir funcionalidades avanzadas,

la nanotecnología se postula como una herramienta disruptiva. La incorporación de nanorefuerzos, como las nanopartículas de plata (AgNPs), dentro de la matriz de biopolímeros permite el desarrollo de nanocompuestos o empaques activos. Estos materiales no solo mejoran las propiedades mecánicas y de barrera del film, sino que confieren una potente actividad antimicrobiana y antioxidante continua, capaz de extender la vida útil del alimento envasado (Azeredo et al., 2019). Las AgNPs son particularmente efectivas debido a su alta relación superficie/volumen y sus mecanismos de acción multifacéticos, que incluyen la interrupción de la membrana celular microbiana, la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) y la interacción con el material genético (Vazquez-Muñoz et al., 2014).

La aplicación de estos nanocompuestos en matrices cárnicas, específicamente en carne de cerdo, representa un desafío y una oportunidad de gran relevancia. El músculo *Longissimus dorsi* de cerdo es un producto de alto valor comercial pero altamente perecedero, susceptible a los procesos de oxidación lipídica y proteica, así como a la proliferación microbiana, principalmente bacterias psicrótrofas y enterobacterias (Bekhit et al., 2013). Estos procesos de deterioro se manifiestan en un incremento de la purga, cambios de color indeseables (pérdida de rojo y desarrollo de metamioglobina), rancidez, pérdida de ternura y, finalmente, en un riesgo para la salud del consumidor (Huff-Lonergan y Lonergan, 2005). Un empaque activo y biodegradable eficaz debe, por tanto, ser capaz de monitorizar y controlar simultáneamente estas múltiples vías de degradación.

Si bien existen numerosos estudios *in vitro* que documentan las propiedades antimicrobianas de films de quitosano/gelatina tipo B con AgNPs, la evidencia sobre su desempeño real en sistemas alimentarios complejos, bajo condiciones de almacenamiento refrigerado, y su impacto integral en los parámetros de calidad fisicoquímicos, microbiológicos y sensoriales de la carne de cerdo, sigue siendo fragmentaria y a menudo inconexa (Kumar et al., 2019). Existe una brecha crítica entre la caracterización del material y su validación como solución de envasado aplicada. Comprender las

interacciones dinámicas entre el nanocompuesto, el exudado de la carne y la microbiota presente es fundamental para predecir su eficacia y vida útil real.

Por lo expuesto, esta investigación se plantea los siguientes objetivos:

Desarrollar un empaque biodegradable tipo película a base de biopolímeros con aplicación de nanopartículas de plata para lomos de cerdo.

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los biopolímeros desarrollados.

Evaluar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas de lomos de cerdo en función del empaque creado y el tiempo de almacenamiento

## Materiales y Métodos

### Ubicación de la Investigación

La investigación se llevó a cabo en las instalaciones de la Planta de Cárnicos, Laboratorio de Análisis de Alimentos (LAAZ) y el Laboratorio de Microbiología de Alimentos de Zamorano (LMAZ), donde se analizaron las unidades experimentales. Asimismo, los animales utilizados para la obtención de las canales fueron obtenidos de la Unidad de Ganado Porcino, ambos pertenecientes a la Universidad Zamorano. Además, se llevó a cabo parte del estudio en el puesto de Ventas de la Universidad Zamorano, ubicada en el Valle del Yeguaré, km 30 al Este de Tegucigalpa, Carretera de Tegucigalpa a Danlí, Municipio de San Antonio de Oriente, Francisco Morazán, Honduras.

### Descripción del Estudio

El estudio se dividió en tres fases, siendo estas, Fase I: el desarrollo y caracterización de las biopelículas; Fase II: la evaluación de las características fisicoquímicas y microbiológicas de la carne de cerdo empacada, y la Fase III: la aceptabilidad de los empaques; las cuales se presentan a continuación:

#### ***Fase I: Desarrollo y Caracterización de las Biopelículas***

Se llevaron a cabo pruebas preliminares para conocer la proporción ideal para la elaboración de las biopelículas tomando como base el estudio de Rodríguez y Andino (2022) (Cuadro 1).

### Cuadro 1

*Formulación para elaboración de películas según Rodríguez y Andino (2022).*

Tratamientos	Solución de quitosano (%)	Solución de gelatina (%)	Aceite esencial de Romero (%)	Glicerol (%)
TRT1	48.875	48.875	1.000	1.250
TRT2	57.450	38.300	3.000	1.250
TRT3	58.650	39.100	1.000	1.250
TRT4	47.875	47.875	3.000	1.250

*Nota.* TRT=Tratamiento. % = porcentaje

### ***Tratamientos Evaluados.***

Posterior a evaluar diferentes concentraciones en pruebas preliminares, se tomaron los siguientes tratamientos (Cuadro 2):

#### **Cuadro 2**

*Descripción de los tratamientos evaluados en la caracterización de las biopelículas.*

Tratamientos	Biopolímero
Control	Película transparente para alimento (polietileno de baja densidad)
Tratamiento 1	Quitosano (33.75%), gelatina tipo B (65%), glicerol (1.25%)
Tratamiento 2	Quitosano (33.25%), Gelatina tipo B (64.5%), glicerol (1.25%) nanopartículas de plata (1%)

### ***Generalidades del Quitosano.***

De acuerdo con López et al. (Olivia Valeria López et al., 2018), el quitosano es un polisacárido obtenido a partir de exoesqueletos de crustáceos y posee un efecto antimicrobiano para hongos y bacterias causantes de enfermedades transmitidas por alimentos (ETAs). Posee una estructura lineal y catiónica (2-amino-desoxi- $\beta$ D-glucano con enlaces 1,4) derivado del desacetilado de quitina, el cual es un polisacárido no tóxico (Giraldo, 2015) de alta estabilidad, biodegradabilidad y bajo costo. El quitosano como agente antimicrobiano presenta varias ventajas sobre otros tipos de envases activos, ya que posee una mayor actividad antibacteriana, un espectro de acción más amplio, una tasa de inhibición mayor contra patógenos como hongos, levaduras, bacterias Grampositivas y negativas, disminuyendo el deterioro de los alimentos de origen animal y vegetal (Valenzuela V. y Arias, 2012).

### ***Generalidades de la Gelatina Tipo B.***

La gelatina tipo B es una molécula de proteínas solubles en agua, esta se deriva de la hidrólisis del colágeno, la cual es una proteína fibrosa que constituye huesos, cartílagos y piel de bovinos y porcinos que tienen un efecto en las propiedades de la gelatina B (Gómez-Estaca et al., 2011). La gelatina B tiene la capacidad de formar geles transparentes, lo que lo hace un material valioso para la investigación de las propiedades funcionales de los hidrocoloides (Djagny et al., 2001). De acuerdo

con Quintanilla Portillo (Quintanilla, 2016), la gelatina B puede ser usada como material de recubrimiento en productos cárnicos debido a que actúa como barrera ante el agua y oxígeno, limitando la pérdida de agua y la oxidación de grasas que al final extiende la vida útil del producto.

#### ***Generalidades de las Nanopartículas de Plata.***

Las nanopartículas de plata (Ag-NP) poseen un tamaño entre 1 y 100 nm en al menos una dimensión (escala:  $10^{-9}$  m), donde la disminución del tamaño, el radio entre el área de superficie y el volumen se incrementa en forma muy importante a modificaciones significativas en sus propiedades físicas, químicas y biológicas (Cardoso, 2016). Las nanopartículas de plata poseen un gran potencial en aplicaciones biomédicas como agente bactericida, fungicida, antiviral o cicatrizante, antioxidante, debido a sus propiedades ópticas, eléctricas, mecánicas y estructurales; su fotoactividad las promueve como agente antimicrobiano (bactericida-fungicida) y han resultado ideales para marcaje celular (Sánchez Moreno, 2017) ; por tales motivos, tiene una amplia aplicación en la industria alimentaria, como en el desarrollo de envases activos e inteligentes; desarrollos de nuevos productos (Quintero Zavala, 2018); (Ojeda Asensio, 2014) y mejoras en el proceso de conservación de los alimentos (González López et al., 2021; Ortega, 2021; Cruz-Monterrosa et al., 2017).

#### ***Elaboración de las Biopelículas.***

Para la elaboración de las biopelículas se utilizó la metodología descrita por Rodríguez y Andino (Rodríguez y Andino) con algunas modificaciones.

***Elaboración de Solución de Quitosano al 1%.*** Se preparó una solución de quitosano al 1% (p/v) pesando 1 g de quitosano, el cual se disolvió en 99 mL de agua destilada conteniendo ácido acético al 1% (v/v), considerando que el quitosano es insoluble en agua, pero soluble en ácidos orgánicos. La mezcla se sometió a agitación constante mientras se elevó la temperatura hasta  $60 \pm 2$  °C, favoreciendo la disolución del polímero. Posteriormente, la solución se dejó enfriar a temperatura

ambiente y se mantuvo en agitación continua a 400 rpm durante 24 h, con el fin de asegurar la completa solubilización de las moléculas de quitosano y obtener una solución homogénea.

**Elaboración de Solución de Gelatina Tipo B al 2.26%.** Para la elaboración de la solución de gelatina tipo B se pesó 2.26 g y a la vez, se midió 100 mL de agua destilada. Luego de ello, se mezcló la gelatina en una concentración de 2.26 (p/v) hasta alcanzar una temperatura de  $60 \pm 2$  °C en agitación constante.

**Elaboración de las Películas por el Método de Casting.** Se realizaron pruebas preliminares para establecer la formulación de cada tratamiento. La formulación final se muestra en el Cuadro 2. Se utilizó el método de casting para la elaboración de la película. Este método consiste en un proceso de elaboración en el cual un material líquido es vaciado en un molde y luego se solidifica a un determinado tiempo, temperatura y humedad controlada para formar películas homogéneas. Para la elaboración de la película se mezcló la solución de quitosano al 1%, solución de gelatina tipo B al 2.26%, y el glicerol en un beaker para el Tratamiento 1 y los mismos componentes, más la nanopartícula de plata para el Tratamiento 2. Seguidamente se midió el pH de la solución con un potenciómetro, se llevó a un valor de pH de la solución de 5.5 a 5.8 agregando NaOH al 1N. Posterior a ello, se colocó en una plancha magnética con agitación constante hasta alcanzar una temperatura de  $80 \pm 2$  °C a 350 rpm, se dejó enfriar hasta que alcanzó una temperatura de 50 °C. Se vertió la solución (0.175 g/cm<sup>2</sup>) en moldes de acetato de 27×21 cm. Seguidamente, se colocó a temperatura ambiente en una campana de extracción de gases hasta que se secan.

#### **Variables Analizadas para la Caracterización de las Biopelículas.**

Se evaluaron propiedades físicas y mecánicas de los biopolímeros desarrollados, cuales se describen a continuación:

**Índice de solubilidad.** Se utilizó el método E96-80 descrito en la norma ASTM (2002). Para ello, se recortaron cinco cuadros de 2×2 cm a partir de cada película, se registró su peso inicial y se colocaron en un recipiente con 30 mL de agua destilada, manteniéndolos en agitación constante

durante 24 horas. Finalizado este tiempo, el agua fue retirada utilizando un filtro con el fin de recuperar los sólidos desprendidos de la película. Posteriormente, el material obtenido se secó en un horno a 105 °C durante 24 horas. Finalmente, se registró el peso seco y se calculó el porcentaje de solubilidad empleando la Ecuación 1.

$$\%Solubilidad = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100 \quad [1]$$

**Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA).** El procedimiento se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM E96-80. Se recortaron discos de 10 cm de diámetro y se colocaron en vasos volumétricos que contenían  $30 \pm 2$  g de agua desionizada a 25 °C. Posteriormente, los vasos se mantuvieron en desecadores durante un periodo de siete días. Las muestras fueron pesadas cada 24 horas y el cálculo se realizó empleando la Ecuación 2.

$$PVA = m \left( \frac{x}{A\Delta P} \right) \quad [2]$$

Donde:

$m$  = Pendiente de la pérdida de peso de la película en función del tiempo (g/día).

$A$  = Área de permeabilidad ( $m^2$ ).

$x$  = Grosor de la película (m).

$\Delta P$  = Diferencia de presiones entre el gel de silicato (0 kPa a 25 °C) y el vapor de agua pura (3.167 kPa a 25 °C).

**Biodegradabilidad.** El procedimiento se llevó a cabo siguiendo la metodología propuesta por Díaz Alejandro (2021), con algunas modificaciones. Para esta etapa del estudio, se recortaron cuadrados de  $2 \times 2$  cm a partir de las biopelículas y se registró su peso inicial. Posteriormente, las muestras fueron enterradas a 5 cm de profundidad en vasos plásticos con orificios, los cuales se mantuvieron durante 10 días en las afueras de las instalaciones del Laboratorio de Análisis de Alimentos de Zamorano (LAAZ).

Las características fisicoquímicas del suelo se determinaron en el Laboratorio de Suelos de Zamorano. Aunque no se registraron las condiciones climáticas durante el ensayo, todas las repeticiones permanecieron bajo las mismas condiciones ambientales. Finalizado el periodo de prueba, las muestras fueron recuperadas, pesadas en una balanza analítica y se calculó el porcentaje de biodegradabilidad mediante una relación gravimétrica. Para este cálculo se empleó la Ecuación 3.

$$\% \text{ de biodegradabilidad} = [100 - (\frac{\text{peso final}}{\text{peso inicial}})] * 100 \quad [3]$$

**Resistencia a la Perforación.** Según el método descrito por Rodríguez y Andino en (Rodríguez y Andino) se cortaron tiras de película con dimensiones de 50 mm de largo por 25 mm de ancho para realizar la prueba. Estas muestras fueron evaluadas utilizando un texturómetro Brookfield CT3 4500, equipado con una sonda TA44 de 4 mm de diámetro, operando a una velocidad constante de 1 mm/s. La fuerza de perforación se determinó a partir del desplazamiento de la sonda hasta que se produjo la ruptura de la película. Además, se registró el espesor promedio de cada muestra con el fin de calcular la resistencia a la perforación, de acuerdo con la Ecuación 4.

$$\text{Resistencia a la perforación (h)} = \frac{Fp}{L} \quad [4]$$

Donde:

h = Resistencia a la perforación.

Fp = Pico de fuerza antes de la ruptura (N)

L = Grosor de la película (mm)

**Módulo de Young y Deformación Lineal.** La determinación se llevó a cabo utilizando un texturómetro Brookfield CT3 4500, equipado con una sonda TA-DGA. Se estableció una distancia de 50 mm entre mordazas y una velocidad de ensayo de 1 mm/s. Para realizar la prueba, se cortaron tiras de película con dimensiones de 70 mm de longitud y 10 mm de ancho, con el objetivo de evaluar el esfuerzo perpendicular aplicado hasta provocar el estiramiento y fractura de las muestras. Esta prueba

de elongación permitió obtener tres propiedades mecánicas: fuerza de tensión a ruptura, la deformación y el módulo de Young.

La tensión de estrés se calculó como la relación entre la fuerza necesaria para romper la película (en Newtons) y el área de su sección transversal (en metros cuadrados), de acuerdo con lo propuesto por (Vicenteni, 2003). El área transversal fue determinada a partir del grosor y el ancho de cada tira.

Para establecer el módulo de Young, se utilizó la Ecuación 5, y la tensión de estrés se calculó mediante la Ecuación 6 y la deformación en la ruptura por la Ecuación 7.

$$\text{Módulo de Young} = \frac{\text{Tensión de estrés (MPa)}}{\text{Deformación}} \quad [5]$$

$$\text{Tensión de estrés} = \frac{(Cm)}{At} \quad [6]$$

Donde:

Cm= Carga máxima (N).

At= Área transversal de la película (m<sup>2</sup>).

$$\text{Deformación Lineal (\%)} = \frac{L-L_0}{L_0} \times 100 \quad [7]$$

Donde:

L= Longitud final.

Lo= Longitud inicial.

### ***Fase II: Evaluación de las Propiedades Fisicoquímicas y Microbiológicas en Lomo de Cerdo***

Se evaluaron características fisicoquímicas y microbiológicas de la carne de cerdos, producidos en la granja tecnificada de la Universidad Zamorano, con tres tratamientos en la etapa de procesamiento y conservación. Los cerdos analizados fueron cosechados mediante la insensibilización y aturdimiento eléctrico, utilizando los procedimientos establecidos por la planta de cárnicos de la universidad, posteriormente enfriados y despostados, obteniendo el músculo *Longissimus dorsi*.

Para este estudio se utilizaron 9 cerdos seleccionados al azar, de cada canal se extrajo el lomo completo, realizando el corte desde la primera vértebra torácica (T1) hasta la última vértebra lumbar (L6–L7). De cada lomo se tomó una libra ( $\approx 0.45$  kg) para los análisis fisicoquímicos y microbiológicos.

### ***Descripción de los Tratamientos.***

Se evaluaron las características fisicoquímicas y microbiológicas de la carne del corte lomo de cerdos, en la etapa de empaqueo, bajo el efecto de 9 tratamientos (arreglo factorial de 2x3) con tres repeticiones cada uno, cuales se describen en el Cuadro 3 y visualizar en la Figura 1:

### **Cuadro 3**

#### *Descripción de los tratamientos evaluados*

No. Tratamiento	Polímero	Tiempo
1	Película transparente para alimento (Control)	Día 1
2	Película transparente para alimento (Control)	Día 5
3	Película transparente para alimento (Control)	Día 10
4	Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 1
5	Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 5
6	Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 10
7	Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 1
8	Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 5
9	Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 10

*Nota.* El sistema de empaque consistió en el polímero más una bandeja de poliestireno y almohadillas absorbentes. Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%).

**Figura 1**

*Sistemas de empaques evaluados*



#### ***Variables Físicoquímicas y Microbiológico***

**pH.** Para la determinación del pH de las muestras se utilizó el método AOAC 981.12 (Latimer, 2012) adaptado para suspensión en solución acuosa. Se tomaron muestras representativas de lomos frescos y refrigerados, pesando 10 gramos de cada muestra. Estas muestras se colocaron en recipientes de vidrio, a los cuales se les añadió 90 mL de agua destilada para obtener una relación de 1:10 (carne: agua). Posteriormente, se mezcló con agitador magnético cada suspensión hasta lograr una mezcla homogénea. Midiendo el pH de cada suspensión, se utilizó un potenciómetro calibrado con soluciones buffer estándar (pH 4.0, 7.0, y 10.0), asegurando así la precisión de las mediciones. Se registraron los valores de pH estabilizados para cada muestra.

**Color (Hunter  $L^*a^*b$ ).** Para la medición del color se utilizó la metodología descrita por Alarcón Rojo et al. (Alarcón Rojo et al., 2006) y el método ASTM E1347-06. Se utilizó un colorímetro ColorFlex Hunter Lab®, el cual se calibró con los discos estándar negro y blanco de acuerdo con las indicaciones

del software. La escala utilizada fue L, a, b. “L” indica la claridad (luminosidad), donde 100 es blanco y 0 es negro. Los valores “a” y “b” son las coordenadas de cromaticidad, donde el valor positivo de “a” representa tendencia a color rojo y negativo “a” indica tendencia a color verde; el valor positivo “b” señala el color con tendencia a amarillo y negativo b\* indica el color azul.

Las diferencias del color fueron expresadas como un valor numérico “ $\Delta E_{ab}$ ”, en donde se establece un diferencial entre las variables L, a, b para el valor de referencia y el de interés. Este valor indicó qué tan diferentes son los colores de los lomos con los tratamientos aplicados con relación al control. Para el cálculo de la diferencia de color se utilizó el “ $\Delta E^*_{Lab}$ ”, mediante la Ecuación 8:

$$\Delta E^*_{Lab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad [8]$$

**Purga.** Se determinó de acuerdo con la metodología descrita por (González Teo, 2022) los cortes se pesaron en una balanza digital y se colocaron en bandejas de poliestireno para su posterior empacado. Las muestras fueron limpiadas removiendo la capa de agua que recubrían los cortes y se pesaron al finalizar su tiempo de almacenamiento. La purga se determinó mediante la diferencia de peso entre el peso inicial y peso final expresada en porcentaje mediante la Ecuación 9:

$$\%Purga = \frac{peso\ inicial\ (g) - peso\ final\ (g)}{peso\ inicial\ (g)} * 100 \quad [9]$$

**Fuerza de Corte (Newton).** Se utilizó un texturómetro de Brookfield CT3 4500 calibrado según la Indicación LAA-I-004-003 y utilizando el ensamble de corte de alambre TA-WSP. La fuerza de corte de la carne de cerdo fue medida en Newtons. Se extrajeron piezas cúbicas de 30 mm/lado, las cuales fueron sometidas a una compresión del 35% de su tamaño original, a una velocidad de 20 mm/s (Anexo).

**Recuento de Bacterias Mesófilas Aerobias.** Para la determinación de bacterias mesófilas aerobias se utilizó el método estándar recomendado por la Asociación Americana de Salud Pública (APHA, por sus siglas en inglés). Se tomaron muestras representativas de los lomos de 10 g y se prepararon diluciones seriadas utilizando solución buffer fosfato (PBS) usando 1 gramo de muestra en

9 mL de solución PBS. Cada dilución se sembró en placas Petri conteniendo agar cuenta estándar, mediante el método de vaciado en placa. Posteriormente se llevó a incubación a 37 °C durante 48 horas, se procedió a realizar el conteo de colonias visibles, asegurando que cada placa tuviera una cantidad adecuada de colonias para una evaluación precisa. Los resultados fueron expresados como Logaritmos de Unidades Formadoras de Colonias (Log UFC) por gramo de muestra.

### ***Fase III: Aceptación, Preferencia y Disposición a Pagar por el Consumidor***

Se realizó una encuesta a panelistas adultos para determinar la percepción del consumidor sobre los empaques creados y su impacto en la decisión de compra. A través del análisis de los datos recolectados, se pudo determinar si los consumidores perciben los empaques creados como un factor importante al momento de adquirir la carne y si esta percepción afecta su disposición de compra.

#### ***Procedimiento***

Se llevó a cabo una encuesta dirigida a clientes externos del puesto de ventas de Zamorano con el objetivo de recopilar su percepción y aceptación respecto a los empaques de este estudio. La aplicación de la encuesta se realizó de manera presencial, abordando a los clientes que llegaban a las instalaciones. A través de un formulario en “Google Forms”, se les brindaba una breve explicación sobre el contexto y propósito de la encuesta, y posteriormente se les invitaba a completarla de forma voluntaria.

La encuesta estaba compuesta por preguntas estructuradas, de opción múltiple y una escala hedónica. Este tipo de encuesta permitió recopilar información de manera sistemática y estructurada para analizar las diferentes variables de interés en la investigación (Anexo 1).

No se aplicaron criterios específicos, como apariencia o edad, para la selección. El objetivo principal de esta estrategia fue reducir el sesgo de la investigación, de esta manera, se maximizó la representatividad de la muestra.

## Diseño Experimental

Para cada fase el estudio se utilizan diferentes diseños experimentales, cuales se describen a continuación:

### ***Fase I: Desarrollo y Caracterización de las Biopelículas***

Se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA), evaluando tres tratamientos (Cuadro 3), con tres repeticiones por tratamiento, siendo un total de 9 unidades experimentales. El modelo estadístico se representa en la Ecuación 10:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + \epsilon_{ij} \quad [10]$$

Donde:

$Y_{ij}$ : Características físicas y mecánicas de la biopelícula.

$\mu$ : Media general de las variables medidas

$A_i$ : Número de tratamientos.

$\epsilon_{ij}$ : Error experimental asociado a las unidades experimentales.

Lo cual significa que las variables respuesta características físicas y mecánicas de la biopelícula ( $Y_{ij}$ ) está en función de la media general ( $\mu$ ) del efecto de los tres tratamientos ( $A_i$ ) y del error experimental asociado a las 9 unidades experimentales ( $\epsilon_{ij}$ ) bajo los supuestos del modelo de muestreo ideal, los términos de error asociados a cada una de las observaciones se suponen independientemente distribuidos, normales con esperanza 0 y varianza constante.

Para la investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nulas ( $H_0$ ):

$$A_i = B \text{ para todo } i \text{ (todos los tratamientos son iguales).}$$

Hipótesis alternativas ( $H_a$ ):

$$A_i = A \text{ para al menos un } i \text{ (Al menos un tratamiento es diferente).}$$

**Fase II: Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas en lomo de cerdo**

Se empleó un Diseño Completamente al Azar (DCA), bajo un arreglo factorial de 3x3 evaluando dos factores con tres niveles cada factor (Cuadro 3) con tres repeticiones por nivel, siendo un total de 27 unidades experimentales. El modelo estadístico se representa en la ecuación 11:

$$Y_{ij} = \mu + A_i + T_j + A_i * T_j + \epsilon_{ij} \quad [11]$$

Donde:

$Y_{ij}$ : Características fisicoquímicas y microbiológicas de lomos de cerdo.

$\mu$ : Media general de las variables medidas

$A_i$ : Niveles del factor polímero.

$T_j$ : Niveles del factor tiempo.

$A_i * T_j$ : Interacción entre los niveles del factor polímero y factor tiempo.

$\epsilon_{ij}$ : Error experimental asociado a las unidades experimentales.

Lo cual significa que la variable respuesta características fisicoquímicas y microbiológicas de lomos de cerdo ( $Y_{ij}$ ) está en función de la media general ( $\mu$ ) del efecto de los tres niveles del factor polímero ( $A_i$ ) del efecto de los tres niveles del factor tiempo ( $T_j$ ) del efecto de la interacción de los tres niveles del factor polímero con los tres niveles del factor tiempo ( $A_i * T_j$ ) y del error experimental asociado a las 27 unidades experimentales ( $\epsilon_{ij}$ ) bajo los supuestos del modelo de muestreo ideal, los términos de error asociados a cada una de las observaciones se suponen independientemente distribuidos, normales con esperanza 0 y varianza constante.

Para la investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

Hipótesis nulas ( $H_0$ ):

$A_i = B$  para todo  $i$  (todos los niveles del factor polímero son iguales).

$T_j = T$  para todo  $j$  (todos los niveles del factor tiempo son iguales).

No existe interacción entre los tratamientos con respecto a las mediciones en el tiempo.

Hipótesis alternativas ( $H_a$ ):

$A_i = A$  para al menos un  $i$  (Al menos un tratamiento es diferente).

$T_j = T$  para al menos un  $j$  (Al menos una medición en el tiempo es diferente).

Existe interacción entre los tratamientos con respecto a las mediciones en el tiempo.

### ***Fase III: Aceptación, Preferencia y Disposición a Pagar por el Consumidor***

En la fase III se determinó la aceptación del consumidor, preferencia y disposición a pagar.

Para cada variable se utilizaron diseños diferentes:

#### ***Aceptabilidad de los Empaques y Disposición a Pagar***

El diseño de investigación para estas variables utilizado fue descriptivo transversal múltiple con la recolección de datos primarios. Este diseño implicó la obtención de datos en un momento determinado, en este caso, clientes externos del puesto de ventas de Zamorano, a través de una encuesta. La finalidad de este diseño fue describir y determinar la aceptabilidad y disposición de compra de los consumidores hacia un empaque sostenible y determinar la influencia de las variables independientes en la variable dependiente.

#### ***Preferencia de los Empaques***

La metodología empleada fue la prueba de ranking u ordenamiento, en la cual cada panelista clasificó los tratamientos de acuerdo con su preferencia, asignando el rango 1 al tratamiento más preferido y el rango 3 al menos preferido. Los tratamientos fueron presentados a los panelistas en un orden aleatorio para reducir sesgos de posición y efecto de presentación. Cada panelista evaluó los tres tratamientos bajo condiciones homogéneas.

## **Análisis Estadístico**

Los resultados de la Fase I, Fase II se analizaron el software estadístico SAS<sup>®</sup>, por medio de un análisis de varianza (ANDEVA) y una prueba de comparación múltiples de medias con la prueba Duncan, a un nivel de significancia del 0.05. Se verificaron los supuestos de normalidad, homogeneidad e independencia para todas las variables respuestas para conocer si existirá observaciones atípicas y si fuese ideal para una prueba paramétrica o necesitarían alguna modificación. Asimismo, se realizaron gráficas con el software BioRender<sup>®</sup> para algunas variables de la Fase II.

Para el análisis de la aceptabilidad por el consumidor y la disposición a pagar (Fase III), en el descriptivo transversal múltiple se utilizó el software Excel<sup>®</sup> para la elaboración de gráficas y análisis de los datos.

Para la variable preferencia de los empaques (Fase III) se analizaron mediante la prueba de Basker y Kramer, que permite comparar los rangos promedio asignados a cada tratamiento y determinar la existencia de diferencias significativas entre ellos. El análisis se realizó considerando un nivel de significancia de 0.05.

## Resultados y Discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de las biopelículas, su efecto en las propiedades en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) en almacenamiento a 1 °C y la aceptabilidad, preferencia y disposición a pagar por parte de los consumidores respecto al Día 5:

### Caracterización de las Biopelículas

#### *Fuerza de Perforación, Deformación Lineal y Módulo de Young*

En el Cuadro 4 se presentan los resultados de fuerza a la perforación, deformación lineal y modulo Young de los tratamientos evaluados. Los resultados demuestran diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.05$ ) en la fuerza de perforación y el módulo de Young entre los tratamientos. El T1 (compuesto por una matriz de quitosano y gelatina tipo B), registró los valores más altos, siendo significativamente superior al T2 (una matriz de quitosano, gelatina tipo B y nanopartículas de planta) y al control polimérico.

La resistencia y rigidez de la biopelícula T1 (quitosano y gelatina tipo B) puede atribuirse a la formación de una red polimérica densa y cohesionada, facilitada por interacciones moleculares fuertes entre el quitosano y la gelatina tipo B. De acuerdo con Rivero et al. (2010), la compatibilidad entre estos biopolímeros surge principalmente de interacciones electrostáticas entre los grupos amino protonados del quitosano ( $\text{NH}_3^+$ ) y los grupos carboxilato de la gelatina B ( $\text{COO}^-$ ), formando un complejo polielectrolito que actúa como un entrecruzamiento físico eficaz. Esta red intermolecular robusta aumenta la resistencia a la tracción y la rigidez del material, tal como se refleja en los altos valores de fuerza de perforación y módulo de Young (Haghighi, Leugoue, et al., 2020).

Por su parte, el tratamiento T2, que incorpora nanopartículas de plata (AgNP) a la matriz de quitosano-gelatina, mostró una mejora mecánica significativa frente al control, pero una reducción comparada con T1. Este fenómeno sugiere que, si bien las nanopartículas pueden actuar como agentes de refuerzo, su incorporación podría no ser óptima o interferir levemente con la densa red

polimérica de T1. Según investigaciones por Kumar et al. (Kumar et al., 2020), la efectividad de las nanopartículas como reforzantes mecánicos depende críticamente de su dispersión homogénea dentro de la matriz polimérica. Una agregación o distribución no uniforme de las AgNP podría actuar como puntos de concentración de tensiones, comprometiendo ligeramente la integridad estructural del composite, siendo una posible respuesta de los valores intermedios obtenidos de T2.

En contraste con los parámetros anteriores, el porcentaje de deformación lineal no mostró diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ( $P > 0.05$ ), con valores cercanos al 30% para todos los casos, siendo este el límite superior que proveía el texturómetro del laboratorio bajo las condiciones evaluadas. Este resultado indica que, a pesar de las marcadas diferencias en resistencia y rigidez, la capacidad de todas las películas para estirarse bajo tensión antes de fracturarse es comparable. La similitud en la deformación sugiere que la naturaleza flexible de los biopolímeros base (gelatina B y quitosano plastificados) es el factor dominante que gobierna esta propiedad. La adición de gelatina B en particular, confiere flexibilidad a las películas de quitosano, que de otro modo serían más rígidas y quebradizas (Aitboulahsen et al., 2020). Asimismo, el proceso de fabricación (como el casting por solución) y la presencia de plastificantes, inherentes a la formulación de estos materiales, contribuyen a una capacidad de alargamiento uniforme. Como señala López et al. (O. V. López et al., 2015), la deformación a la rotura es una propiedad altamente influenciada por la plasticización y la movilidad de las cadenas poliméricas, factores que aparentemente se mantuvieron constantes entre las formulaciones, independientemente de los entrecruzamientos o la adición de nanopartículas.

La combinación de una alta resistencia (T1) con una flexibilidad mantenida es altamente deseable para materiales de empaque, ya que deben ser a la vez resistentes a punciones y capaz de deformarse sin romperse ante impactos.

La ligera disminución de las propiedades mecánicas en T2, aunque estadísticamente significativa, no necesariamente representa una desventaja crítica. El compromiso (*trade-off*) entre

una propiedad mecánica ligeramente inferior y la incorporación de una funcionalidad antimicrobiana potente conferida por las nanopartículas de plata debe evaluarse en el contexto de la aplicación final del empaque (Hu et al., 2022), donde para el envasado de productos altamente perecederos o susceptibles a la contaminación microbiana, la funcionalidad antimicrobiana podría ser un atributo más valioso que una resistencia mecánica marginalmente mayor.

#### Cuadro 4

*Caracterización de la fuerza de perforación, deformación lineal y módulo de Young de los biopolímeros de empaque.*

Tratamiento	Perforación (N/mm) ± D.E.	Deformación lineal (%) ± D.E. <sup>NS</sup>	Módulo de Young (MPa/m <sup>2</sup> ) ± D.E.
Control	24.33 ± 0.04 <sup>c</sup>	30.00 ± 0.00	103.27 ± 1.70 <sup>c</sup>
T1	43.30 ± 2.96 <sup>a</sup>	30.00 ± 0.00	183.77 ± 12.56 <sup>a</sup>
T2	34.63 ± 3.65 <sup>b</sup>	29.93 ± 0.12	147.28 ± 15.06 <sup>b</sup>
C.V	7.9930	0.2223	7.8517
R <sup>2</sup>	0.9238	0.2500	0.9263
P-valor	0.0004	0.4219	0.0004

*Nota.* Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: Biopolímero a base de quitosano y gelatina tipo B; T2: Biopolímero de quitosano, gelatina tipo B y nanopartículas de plata; D.E: Desviación estándar; C.V: Coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; P-valor: Probabilidad; <sup>a-c</sup>: Medias seguidas de letras distintas en cada columna indican diferencias entre los tratamientos (P < 0.05). <sup>NS</sup>: no significativo.

#### **Solubilidad, Permeabilidad al Vapor de Agua y Biodegradabilidad en Suelo**

En el Cuadro 5 se presentan los resultados de solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y biodegradabilidad de los tratamientos evaluados, donde se presentan diferencias significativas en todas las variables (P<0.05) entre el empaque control y los desarrollados, lo que tiene implicaciones directas en su funcionalidad y perfil de sostenibilidad.

La propiedad de solubilidad en agua demostró ser una de las diferencias más marcadas. Los biopolímeros T1 y T2 presentaron una solubilidad significativamente mayor (31.27% y 37.51%, respectivamente) en comparación con la película de polietileno de baja densidad (control, 0.80%). Este comportamiento es un indicador clave de la potencial biodegradabilidad de un material y de su

capacidad para ser procesado en sistemas de compostaje. La mayor solubilidad de las biopelículas de quitosano-gelatina se atribuye a la naturaleza hidrofílica de sus componentes poliméricos, los cuales poseen numerosos grupos funcionales (-OH, -NH<sub>2</sub>) que interactúan favorablemente con las moléculas de agua (Saidi et al., 2025). El incremento en la solubilidad de T2 respecto a T1 podría deberse a un efecto plastificante o a modificaciones en la microestructura de la matriz polimérica inducidas por la incorporación de las nanopartículas de plata.

Respecto a la Permeabilidad al Vapor de Agua (PVA), se observó que los biopolímeros T1 y T2 presentaron valores significativamente superiores (0.0701 y 0.0861 g·m<sup>-1</sup>·día<sup>-1</sup>·kPa<sup>-1</sup>, respectivamente) a la película de control (0.0204 g·m<sup>-1</sup>·día<sup>-1</sup>·kPa<sup>-1</sup>). Una PVA elevada es característica inherente de las matrices a base de polisacáridos y proteínas, debido a su alta afinidad por el agua (Awal et al., 2025), siendo una alta PVA una desventaja para productos muy susceptibles a la desecación como la carne (L. Wang et al., 2017). Los valores de permeabilidad al vapor de agua (PVA) obtenidos en el presente estudio resultaron inferiores a los reportados por Rodríguez y Andino (Rodríguez y Andino), quienes documentaron rangos de 0.21 a 0.41 g·m<sup>-1</sup>·día<sup>-1</sup>·kPa<sup>-1</sup> en películas de composición similar. Esta diferencia sugiere que la reformulación de los tratamientos aplicada en esta investigación contribuyó a una reducción significativa de la PVA, evidenciando una mejora en las propiedades de barrera al vapor de agua con respecto al estudio de referencia.

El parámetro más destacable desde el punto de vista ambiental es la biodegradabilidad. Los tratamientos T1 y T2 no mostraron diferencias estadísticas entre sí, pero ambos exhibieron una tasa de biodegradabilidad superior al 82%, significativamente mayor a la del control (0.70%) (Cuadro 5). Este resultado confirma el carácter intrínsecamente compostable de las matrices formuladas con quitosano y gelatina B. Estos biopolímeros son susceptibles al ataque enzimático de microorganismos presentes en ambientes de compostaje, que los metabolizan eficientemente a CO<sub>2</sub>, agua y biomasa, cerrando así el ciclo de vida del material y reduciendo la acumulación de residuos plásticos en el ambiente (Chandarana et al., 2025). La adición de nanopartículas de plata en T2 no inhibió

significativamente este proceso, lo que sugiere que su concentración no fue lo suficientemente alta como para ejercer un efecto biocida sobre la microbiota responsable de la degradación.

### Cuadro 5

*Caracterización de la solubilidad, permeabilidad al vapor de agua y biodegradabilidad de los biopolímeros de empaque.*

Tratamiento	Solubilidad (%) ± D.E.	*PVA ( $\frac{g*m}{dia*m^2*Kpa}$ ) ± D.E.	Biodegradabilidad (%) ± D.E.
Control	0.79 ± 0.03 <sup>c</sup>	0.02 ± 0.002 <sup>a</sup>	0.69 ± 0.08 <sup>b</sup>
T1	31.26 ± 1.00 <sup>b</sup>	0.07 ± 0.007 <sup>b</sup>	82.95 ± 0.62 <sup>a</sup>
T2	37.50 ± 0.79 <sup>a</sup>	0.08 ± 0.008 <sup>b</sup>	82.76 ± 1.42 <sup>a</sup>
C.V	3.5321	14.0838	1.2304
R <sup>2</sup>	0.9988	0.9624	0.9998
P-valor	<.0001	0.0014	<.0001

*Nota.* \*PVA: Permeabilidad al Vapor de Agua; Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: Biopolímero a base de quitosano y gelatina tipo B; T2: Biopolímero de quitosano, gelatina tipo B y nanopartículas de plata; D.E: Desviación estándar; C.V: Coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; P-valor: Probabilidad; <sup>a-c</sup>: Medias seguidas de letras distintas en cada columna indican diferencias entre los tratamientos (P < 0.05).

### Efecto en las propiedades de lomo de cerdo (*Longissimus dorsi*)

#### **Pérdida por Purga**

La pérdida por purga es el exudado de fluido que se libera de la carne como consecuencia de la ruptura de las fibras musculares y la desnaturalización proteica (Johnson et al., 2023), siendo un parámetro crítico de calidad que impacta directamente en el rendimiento económico, la jugosidad, el color y la aceptabilidad general del producto. Los resultados mostrados en el Cuadro 6 y Figura 2 presentan los resultados de la pérdida por purga de los tratamientos evaluados, donde se presentó diferencias significativas (P<0.05) entre los tratamientos, existiendo interacción entre los niveles del factor polímero con los niveles del factor tiempo.

La película transparente para alimentos (Control) demostró un comportamiento característico de las barreras sintéticas tradicionales. Mostró un pico significativo de purga en el Día 5 (20.86%),

seguido de una notable reducción para el Día 10 (8.18%). Este patrón puede explicarse por la dinámica de presión dentro del empaque. Inicialmente, la película sintética, con sus propiedades de barrera altamente impermeables, crea un ambiente sellado donde los fluidos liberados por la carne se acumulan. La significativa purga al Día 5 refleja esta acumulación. Sin embargo, para el Día 10, es plausible que una parte de este exudado haya sido reabsorbido parcialmente por la matriz muscular, un proceso que puede verse favorecido por la presión osmótica y la capacidad de retención de agua de las proteínas no completamente desnaturalizadas, como sugieren estudios recientes sobre la dinámica de fluidos en la carne envasada (J. Wang et al., 2022). Este comportamiento de "reabsorción" aparente es menos pronunciado o alterado en los biopolímeros, lo que sugiere una interacción material-alimento diferente.

Los tratamientos con biopolímeros, T1 y T2, presentaron un perfil de purga marcadamente diferente al Control. En el Día 1, ambos biopolímeros mostraron valores de purga significativamente superiores (T1: 12.02%; T2: 15.86%). Esta tendencia inicial puede atribuirse directamente a la naturaleza hidrofílica de sus componentes principales, el quitosano y la gelatina tipo B.

A diferencia del polietileno apolar, estos biopolímeros poseen grupos funcionales (-OH, -NH<sub>2</sub>) que pueden interactuar con las moléculas de agua libre en la superficie de la carne, promoviendo una migración inicial del fluido hacia el espacio de cabeza del empaque o incluso siendo absorbida ligeramente por la matriz de la biopelícula (Haghighi, Licciardello, et al., 2020). Este hallazgo es consistente con la literatura, donde se reporta que las biopelículas a base de proteínas y polisacáridos a menudo exhiben una mayor tasa de migración de humedad en las etapas iniciales de almacenamiento comparado con los plásticos sintéticos (H. Wang et al., 2018).

Para el Día 5, la purga en ambos biopolímeros alcanzó su punto máximo y fue significativamente mayor que la del Control. Este resultado indica que, si bien la liberación de fluidos continúa, la barrera que presentan estas películas no es tan efectiva como la del polietileno para contenerla en el mismo grado, o que la interacción con el material afecta la cinética de liberación.

El Día 10 es donde se observa la diferencia más crucial entre T1 y T2. El tratamiento T1, sin nanopartículas, mantuvo un nivel de purga muy elevado (19.48%), significativamente mayor que su valor inicial y que el del control en el mismo día. Esto sugiere una limitada capacidad para prevenir la pérdida continua de fluidos o una menor reversibilidad del proceso. En contraste, el tratamiento T2, que incorpora nanopartículas de plata (AgNP), mostró una reducción drástica y estadísticamente significativa de la purga para el Día 10 (13.05%), acercándose numéricamente al valor del control y siendo significativamente menor que el de T1. Esta mejoría sustancial en la retención de fluidos a largo plazo sugiere un efecto positivo de las AgNP más allá de su función antimicrobiana.

El rendimiento superior de T2 hacia el final del almacenamiento puede explicarse por un doble mecanismo. Primero, las nanopartículas de plata pueden actuar como agentes de refuerzo estructural dentro de la matriz de quitosano-gelatina, mejorando la integridad de la red polimérica y reduciendo el tamaño de los poros, lo que resultaría en una barrera ligeramente más efectiva contra la migración de vapores y fluidos (Lago et al., 2014). Segundo, su potente actividad antimicrobiana. La purga es un medio de cultivo ideal para microorganismos. La proliferación bacteriana puede alterar el pH de la carne y promover una mayor desnaturalización proteica y ruptura celular, exacerbando la pérdida de fluidos (Li et al., 2021). Al inhibir eficazmente el crecimiento microbiano, las AgNP en T2 preservan la integridad del tejido muscular por más tiempo, mitigando así la liberación de exudado en las etapas avanzadas de almacenamiento. Este efecto conservador sobre la estructura tisular contrarresta la inherente hidrofiliidad inicial del biopolímero.

## Cuadro 6

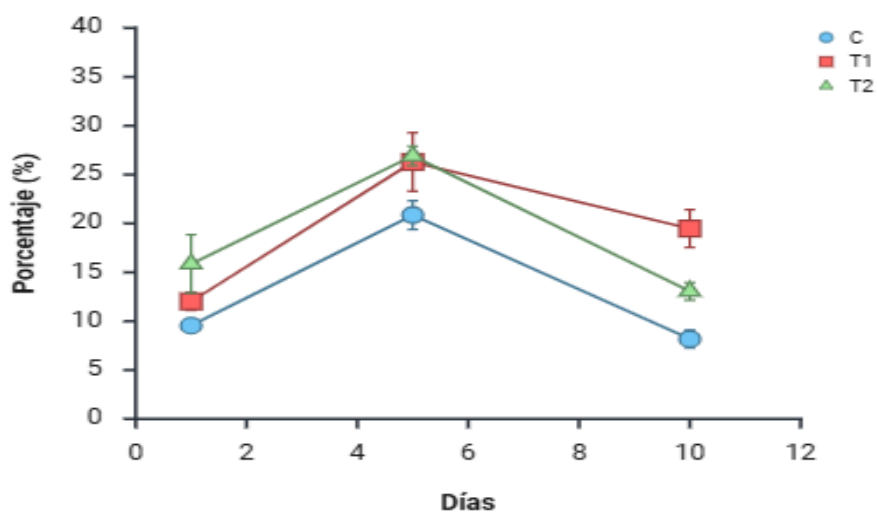
Efecto de los sistemas de empaque sobre el porcentaje de purga en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.

Polímero	Tiempo	Purga (%) ± D.E.
Película transparente para alimento (Control)	Día 1	9.54 ± 0.55 <sup>a</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 5	20.85 ± 1.46 <sup>c</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 10	8.17 ± 0.91 <sup>a</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 1	12.02 ± 0.89 <sup>ab</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 5	26.29 ± 2.99 <sup>d</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 10	19.48 ± 1.92 <sup>c</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 1	15.86 ± 2.98 <sup>b</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 5	26.91 ± 0.98 <sup>d</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 10	13.05 ± 0.89 <sup>b</sup>
C.V (%)		10.3246
R <sup>2</sup>		0.9541
P-valor (interacción)		0.0007

Nota. Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); D.E: Desviación estándar; C.V: Coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; P-valor: Probabilidad; <sup>a-d</sup>: Medias seguidas de letras distintas en cada fila indican diferencias entre los tratamientos (P < 0.05).

## Figura 2

Comportamiento del porcentaje de purga en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.



Nota . C: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%).

### **Efecto en el pH**

La evolución del pH en la carne almacenada es un indicador metabólico y microbiológico crucial, que refleja los procesos bioquímicos *post-mortem* y la actividad microbial, determinantes directos de la calidad y la vida útil del producto (Watanabe et al., 2018). Los resultados expuestos en el Cuadro 7 y Figura 3 presentan los resultados de la medición del pH después de los tratamientos aplicados, con diferencias significativas entre los tratamientos, existiendo interacción entre los niveles del factor polímero con los niveles del factor tiempo ( $P < 0.05$ ).

Se observó una tendencia general al incremento del pH en todos los polímeros a lo largo del almacenamiento, esto puede deberse a la acumulación de compuestos alcalinos derivados de la actividad bacteriana y la descomposición enzimática de las proteínas musculares. La degradación de aminoácidos y la liberación de amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y aminas biógenas, como la putrescina y la cadaverina, neutralizan los ácidos presentes en el medio, elevando progresivamente el pH (J. Wang et al., 2022). El empaque de polietileno (Control) mostró un incremento progresivo y significativo (de 6.24 a 6.57), un comportamiento esperado que sirve como línea base para la evaluación de los biopolímeros.

Respecto al factor tiempo en su nivel Día 1 de almacenamiento, se detectaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre los polímeros. Los lomos envasados con los biopolímeros T1 y T2 presentaron un pH inicial significativamente más alto (6.43 y 6.42, respectivamente) en comparación con el control (6.24). Este hallazgo sugiere una interacción inmediata entre la matriz del biopolímero y la superficie de la carne. Una explicación posible reside en la naturaleza química del quitosano, componente principal de ambas biopelículas. Según Hafsa et al. (2016), las cadenas de quitosano poseen grupos aminos libres ( $-\text{NH}_2$ ) que, en contacto con la superficie húmeda de la carne, pueden ejercer un efecto tampón leve, incrementando ligeramente el pH microambiente en la interfase carne-empaque en comparación con el polietileno, que es químicamente inerte.

En la interacción del nivel Día 5, las diferencias entre el control y los biopolímeros se mantuvieron, presentando diferencia significativa ( $P < 0.05$ ).

Para el nivel Día 10, el biopolímero T2, enriquecido con nanopartículas de plata (AgNP), registró el valor de pH final significativamente más alto (6.72), superando tanto al control (6.57) como a T1 (6.63). Este resultado es de suma importancia y apunta directamente al efecto antimicrobiano de las AgNP. La proliferación de bacterias, especialmente bacterias ácido-lácticas y enterobacterias, es uno de los principales motores del descenso inicial del pH seguido de su posterior aumento por proteólisis y desaminación. Al suprimir eficazmente la carga microbiana, la biopelícula T2 frena la producción inicial de ácidos lácticos y, consecuentemente, permite que los procesos de descomposición alcalina (desaminación) se conviertan en el factor dominante en la evolución del pH en etapas avanzadas, resultando en un valor final más elevado (Li et al., 2021).

Un pH final elevado, como el observado en T2 (6.72), está comúnmente asociado a un estado de deterioro más avanzado en la carne fresca. Sin embargo, en el contexto de un empaque activo con propiedades antimicrobianas demostradas (Helmy, 2016), esta interpretación debe matizarse. La significativa inhibición microbiana provocada por las AgNP en T2 probablemente previno el deterioro organoléptico típico (putrefacción, olores pútridos) a pesar del pH más alto. En este escenario, el pH elevado podría reflejar principalmente la acumulación de amoníaco por la descomposición de compuestos nitrogenados, un proceso que, en ausencia de una alta carga microbiana diversa, no se correlaciona necesariamente con una pérdida inmediata de aceptabilidad sensorial (Haghighi, Leugoue, et al., 2020). Esto sugiere que T2 no solo preserva la carne al inhibir microbios, sino que también modifica la trayectoria química usual del deterioro.

Por el contrario, el control, a pesar de tener un pH final menor, probablemente albergaba una carga microbiana más alta y diversa, indicando un deterioro microbially más activo. El tratamiento T1 mostró un comportamiento intermedio, con un pH final ligeramente superior al control, pero inferior a T2, lo que refuerza la idea de que la matriz de quitosano-gelatina por sí sola posee una actividad antimicrobiana limitada en comparación con cuando se potencian con AgNP.

### Cuadro 7

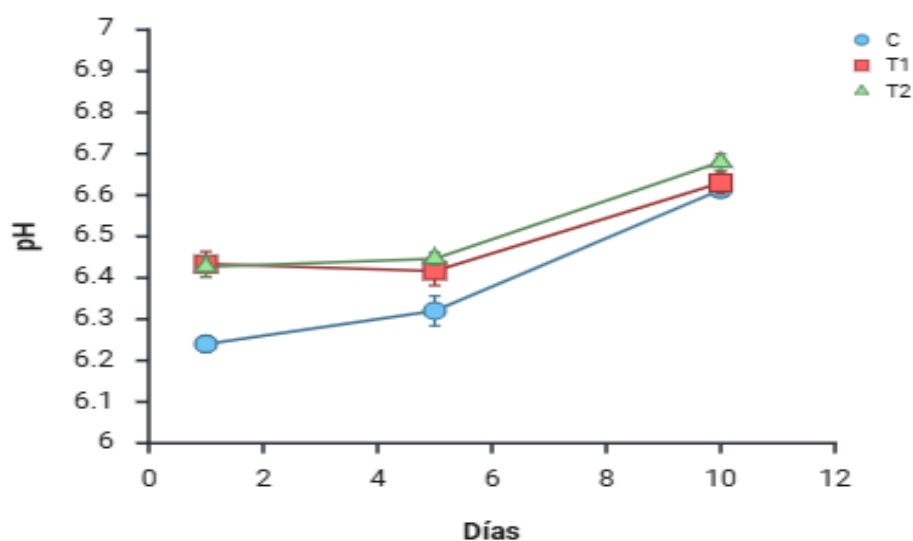
Efecto de los sistemas de empaque sobre el pH en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.

Polímero	Tiempo	Media ± D.E.
Película transparente para alimento (Control)	Día 1	6.24 ± 0.02 <sup>a</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 5	6.32 ± 0.03 <sup>b</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 10	6.61 ± 0.01 <sup>d</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 1	6.43 ± 0.03 <sup>c</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 5	6.41 ± 0.03 <sup>c</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 10	6.63 ± 0.02 <sup>d</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 1	6.42 ± 0.02 <sup>c</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 5	6.44 ± 0.01 <sup>c</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 10	6.68 ± 0.02 <sup>e</sup>
C.V (%)		0.4014
R <sup>2</sup>		0.9770
P-valor (interacción)		0.0003

Nota. Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); D.E: Desviación estándar; C.V: Coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; P-valor: Probabilidad; <sup>a-e</sup>: Medias seguidas de letras distintas en cada fila indican diferencias entre los tratamientos (P < 0.05).

### Figura 3

Comportamiento del porcentaje del pH en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.



Nota. C: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%).

### **Fuerza de corte**

En el Cuadro 8 y Figura 4 se presenta los resultados obtenidos para la fuerza de corte, parámetro crítico en la evaluación objetiva de la terneza de la carne, revelan patrones complejos influenciados tanto por el tipo de empaque como por el tiempo de almacenamiento, existiendo interacción entre los niveles del factor polímero con los niveles del factor tiempo ( $P < 0.05$ ) sugiriendo que los mecanismos de deterioro de la textura son modulados de manera diferencial por las propiedades de cada material de envasado y el tiempo de almacenamiento.

En el Día 1, no se observaron diferencias estadísticas ( $p > 0.05$ ) entre los polímeros T1 y T2, aunque ambos presentaron estadísticamente inferiores al control (C), lo que sugiere un efecto de ablandamiento inicial inducido por la aplicación del recubrimiento. Este fenómeno puede atribuirse a la composición de los biopolímeros, particularmente basados en gelatina tipo B y quitosano, podría haber interactuado con la superficie de la carne, modificando ligeramente la estructura proteica superficial y la retención de agua

En el Día 5 de almacenamiento existió una disminución en la fuerza de corte en comparación con el Día 1, particularmente en los tratamientos T1 y T2. Este fenómeno, que contradice la expectativa tradicional de un aumento progresivo de la dureza, puede explicarse a través de los complejos procesos bioquímicos *post-mortem* que ocurren en el músculo y que son modulados por las condiciones creadas por el empaque.

La reducción en los valores de dureza sugiere un proceso de ablandamiento muscular activo. Este ablandamiento está asociado predominantemente a la actividad proteolítica de las enzimas endógenas del sistema calpaína-catepsina, las cuales permanecen activas durante los primeros días de almacenamiento en refrigeración. Estas enzimas desintegran las proteínas del citoesqueleto que mantienen unidas las miofibrillas, como la titina, la nebulina y la desmina, resultando en una fragmentación de la estructura miofibrilar y, en consecuencia, en una disminución de la resistencia al corte (Ertbjerg, 2022).

Los recubrimientos a base de quitosano y gelatina tipo B crean una atmósfera modificada pasiva alrededor del producto. Al actuar como una barrera semipermeable, reducen la tasa de transferencia de oxígeno, lo que podría generar un ambiente ligeramente microaeróbico. Se ha documentado que condiciones de bajo oxígeno pueden optimizar y prolongar la actividad de las calpaínas, ya que estas enzimas son susceptibles a la oxidación (Bekhit et al., 2021). Por lo tanto, el biopolímero no solo no inhibe este ablandamiento natural, sino que potencialmente crea un ambiente que lo favorece y lo extiende en el tiempo, en contraste con el empaque de polietileno (Control) que permite una mayor permeación de oxígeno.

Es importante destacar que el tratamiento con el polímero Control también mostró una ligera disminución en el Día 5, aunque esta fue estadísticamente mayor que los polímeros T1 y T2. Esto indica que el proceso de ablandamiento enzimático es inherente a la carne, pero su magnitud se ve amplificada por la aplicación de los recubrimientos bioactivos.

La evolución de la fuerza de corte a lo largo del almacenamiento revela el efecto protector de los biopolímeros. Al Día 10, se registró un incremento significativo en la fuerza de corte para todos los tratamientos, fenómeno atribuible al proceso natural de proteólisis limitada y a la posible desnaturalización y agregación de proteínas durante el almacenamiento en refrigeración. No obstante, este aumento fue significativamente menor en las muestras envasadas con T1 (20.22 N) y T2 (20.12 N) en comparación con el control (22.55 N). La menor fuerza de corte, indicativa de una mayor ternura percibida, sugiere que los biopolímeros lograron ralentizar los mecanismos de endurecimiento de la carne.

Este efecto puede explicarse por la capacidad de las matrices de quitosano y gelatina tipo B para modular el ambiente gaseoso dentro del empaque y, crucialmente, por sus propiedades antioxidantes. La oxidación de lípidos y proteínas es un factor clave que contribuye al endurecimiento de la carne durante el almacenamiento, ya que promueve el entrecruzamiento de las proteínas miofibrilares, lo que lleva a una textura más dura (Huang y Ahn, 2019). El quitosano, en particular, ha

demostrado ser eficaz en la supresión de la peroxidación lipídica y la carbonilación proteica, preservando así la integridad estructural de las fibras musculares por más tiempo (Ngo y Kim, 2014). La adición de nanopartículas de plata en T2 no mejoró este aspecto de manera adicional, lo que coincide con hallazgos previos que indican que su principal beneficio reside en la esfera antimicrobiana y no necesariamente en la antioxidante para matrices cárnicas (Ranjan et al., 2016).

### Cuadro 8

*Efecto de los sistemas de empaque sobre la fuerza de corte (Newtons) en lomos de cerdos*

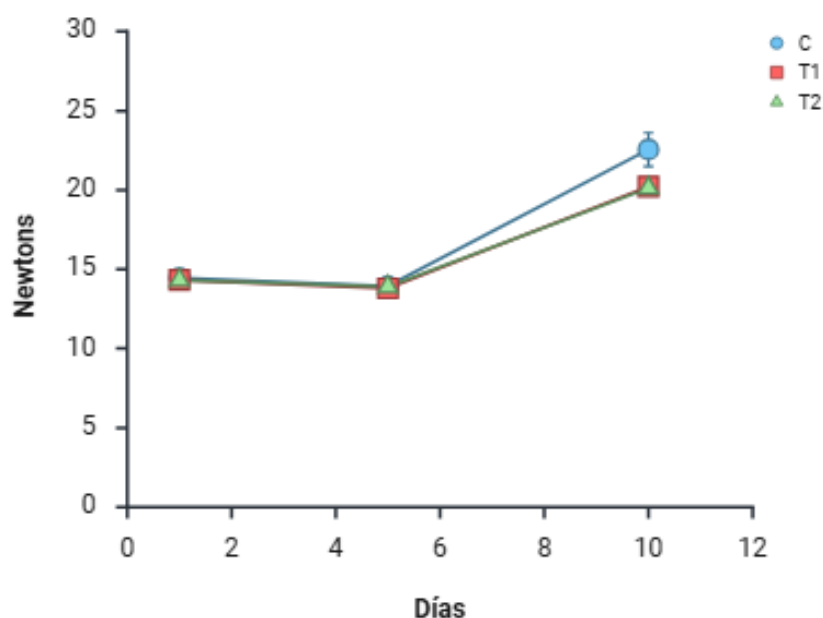
*(Longissimus dorsi) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.*

Polímero	Tiempo	Newtons ± D.E.
Película transparente para alimento (Control)	Día 1	14.45±0.02 <sup>c</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 5	13.93±0.03 <sup>b</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 10	22.55±1.05 <sup>d</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 1	14.32 ±0.03 <sup>a</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 5	13.80±0.01 <sup>a</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 10	20.22± 0.26 <sup>c</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 1	14.31 ± 0.05 <sup>a</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 5	13.89±0.05 <sup>a</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 10	20.12± 1.17 <sup>c</sup>
C.V (%)		2.2534
R <sup>2</sup>		0.9916
P-valor (interacción)		<.0001

*Nota.* Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); D.E: Desviación estándar; C.V: Coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; P-valor: Probabilidad; <sup>a-c</sup>: Medias seguidas de letras distintas en cada fila indican diferencias entre los tratamientos (P < 0.05).

**Figura 4**

Comportamiento del pH en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.



Nota. C: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%).

### Diferencia de color

En el Cuadro 9 y Figura 4 se muestran los resultados del efecto de biopolímeros de empaque sobre la diferencia de color ( $\Delta E^*_{Lab}$ ) en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) a 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C, donde se presentaron diferencias estadísticamente significativas para todos los tratamientos, existiendo interacción entre los niveles del factor polímero con los niveles del factor tiempo ( $P < 0.05$ ).

El polímero control, mostró un incremento progresivo y estadísticamente significativo del  $\Delta E^*$  entre el Día 5 y el Día 10. Este deterioro gradual del color de la carne es consistente con la limitación inherente de los polímeros sintéticos convencionales para controlar eficazmente la permeabilidad al oxígeno y los procesos oxidativos en la interfase empaque-carne durante almacenamientos

prolongados (Nasution et al., 2024). El aumento en  $\Delta E^*$  refleja la oxidación de los pigmentos hemínicos y lipídicos, procesos que avanzan de manera que no se evita incluso en atmósferas modificadas convencionales.

El polímero T1 (biopolímero de quitosano y gelatina tipo B) demostró la mayor eficacia en la preservación del color, evidenciada por la menor variación ( $\Delta E^*$  no significativa,  $P=0.05$ ) entre los Días 5 y 10. Esta notable estabilidad puede atribuirse al efecto sinérgico entre la actividad antioxidante del quitosano y las propiedades de barrera a gases de la matriz de gelatina tipo B. El quitosano actúa como un potente secuestrante de radicales libres y quelante de iones metálicos, mitigando reacciones oxidativas catalíticas (Haghighi-Manesh y Azizi, 2017). Simultáneamente, la gelatina tipo B forma una red macromolecular que reduce significativamente la tasa de permeación al oxígeno, creando un microambiente que protege la mioglobina de su oxidación a metamioglobina (Bermúdez-Oria et al., 2019).

El desempeño del polímero T2, que incorporó nanopartículas de plata (AgNP) a la matriz de biopolímero mostró un valor de  $\Delta E^*$  intermedio al Día 5, sufrió un deterioro elevado al Día 10, alcanzando el valor más alto registrado. Investigaciones recientes indican que las nanopartículas metálicas, incluidas las de plata, pueden catalizar reacciones de oxidación lipídica y de pigmentos en matrices cárnicas mediante la generación de Especies Reactivas de Oxígeno (ROS) y la promoción de reacciones de Fenton, especialmente una vez que se agotan los sistemas antioxidantes endógenos de la carne (Sirelkhatim et al., 2015). La alta reactividad superficial de las AgNP podría, por tanto, acelerar los mecanismos de deterioro del color tras un período de latencia, superando cualquier beneficio antimicrobiano inicial.

### Cuadro 9

Efecto de los sistemas de empaque sobre la diferencia de color ( $\Delta E^*_{Lab}$ ) en lomos de cerdos

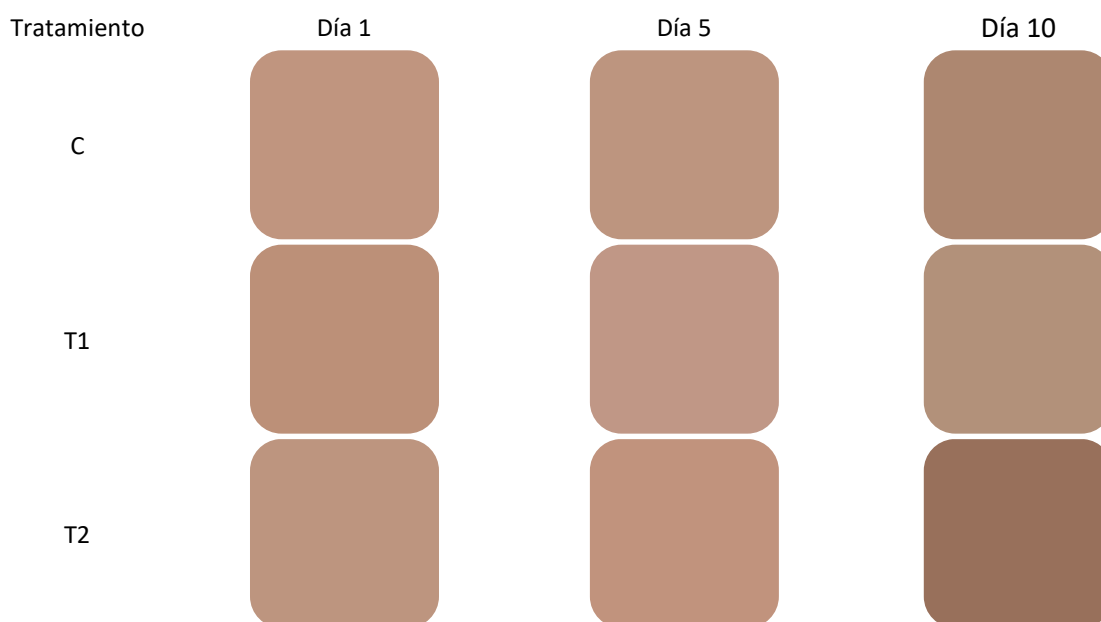
(*Longissimus dorsi*) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.

Polímero	Tiempo	$\Delta E^*_{Lab} \pm D.E.$
Película transparente para alimento (Control)	Día 1	Referencia
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 1	Referencia
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 1	Referencia
Película transparente para alimento (Control)	Día 5	2.64 $\pm$ 0.21 <sup>a</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 10	6.57 $\pm$ 0.70 <sup>b</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 5	3.73 $\pm$ 0.16 <sup>a</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 10	4.09 $\pm$ 0.37 <sup>a</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 5	3.16 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 10	16.33 $\pm$ 1.88 <sup>c</sup>
C.V (%)		13.4390
R <sup>2</sup>		0.9838
P-valor (interacción)		<.0001

Nota. Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); D.E: Desviación estándar; C.V: Coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; P-valor: Probabilidad; <sup>a-c</sup>: Medias seguidas de letras distintas en cada fila indican diferencias entre los tratamientos (P < 0.05).

### Figura 5

Color en lomos de cerdos (*Longissimus dorsi*) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.



Nota. C: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%). Color determinado en la aplicación "colormine.org" a partir de los valores L, a y b en los análisis.

### ***Bacterias Aerobias Mesófilas***

En el Cuadro 10 se presentan los resultados del recuento de bacterias Aerobias Mesófilas. Se observa un incremento progresivo y significativo ( $P < 0.05$ ) en los recuentos de bacterias mesófilas aerobias en todos los tratamientos a lo largo del almacenamiento. Este comportamiento sigue el patrón esperado de crecimiento microbiano en productos cárnicos refrigerados, donde las bacterias adaptadas a temperaturas de refrigeración proliferan gradualmente (H. Wang et al., 2018). El aumento desde aproximadamente 2.5 log UFC/g en el Día 1 hasta valores superiores a 4.0 log UFC/g al Día 10 indica una progresión constante de la actividad microbiana, existiendo interacción entre los niveles del factor polímero con los niveles del factor tiempo ( $P < 0.05$ ).

En el Día 1 se observan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre todos los polímeros, con el menor recuento microbiano en T2 (2.25 log UFC/g), seguido por T1 (2.41 log UFC/g) y finalmente el Control (2.60 log UFC/g). Esta efectividad inmediata puede atribuirse a las propiedades antimicrobianas intrínsecas del quitosano, cuya carga positiva interactúa con la superficie celular bacteriana de carga negativa, alterando la permeabilidad de la membrana celular y provocando la lisis celular (Luo et al., 2023). La adición de nanopartículas de plata en T2 potencia este efecto a través de múltiples mecanismos, incluyendo la generación de especies reactivas de oxígeno, la interrupción de la función enzimática y el daño al ADN bacteriano (Rachtanapun et al., 2024).

En el Día 5, la progresión del crecimiento microbiano muestra el mismo patrón de efectividad, donde T2 mantiene su superioridad (3.61 log UFC/g) frente a T1 (3.89 log UFC/g) y Control (4.06 log UFC/g). La diferencia significativa entre T1 y T2 confirma el valor adicional de las nanopartículas de plata en la supresión del crecimiento bacteriano durante la fase logarítmica de crecimiento. La gelatina tipo B en la matriz del biopolímero, aunque principalmente estructural, puede contribuir a la liberación controlada de los compuestos activos, prolongando su efectividad antimicrobiana (Chen et al., 2025).

En el Día 10, si bien todos los tratamientos alcanzan sus valores máximos, se mantienen las diferencias significativas entre ellos. Es notable que T2 presente el menor recuento final (4.14 log UFC/g), lo que sugiere una actividad antimicrobiana sostenida. El hecho de T1 no difiera significativamente del Control en el nivel Día 10 indica que el quitosano solo tiene una capacidad limitada para controlar el crecimiento microbiano a largo plazo, mientras que la incorporación de nanopartículas de plata en T2 extiende significativamente la efectividad antimicrobiana.

Los resultados sugieren que mientras los biopolímeros, especialmente T2, son efectivos para retrasar el crecimiento microbiano inicial, dado que su efecto no es suficiente para prevenir completamente el deterioro microbiano a largo plazo. El punto de corte de 6-7 log UFC/g, considerado como el límite de aceptabilidad para carne fresca (ICMSF, 2018), no fue alcanzado en el período de estudio, indicando que todos los tratamientos mantuvieron la carne dentro de parámetros aceptables durante los 10 días de almacenamiento.

### Cuadro 10

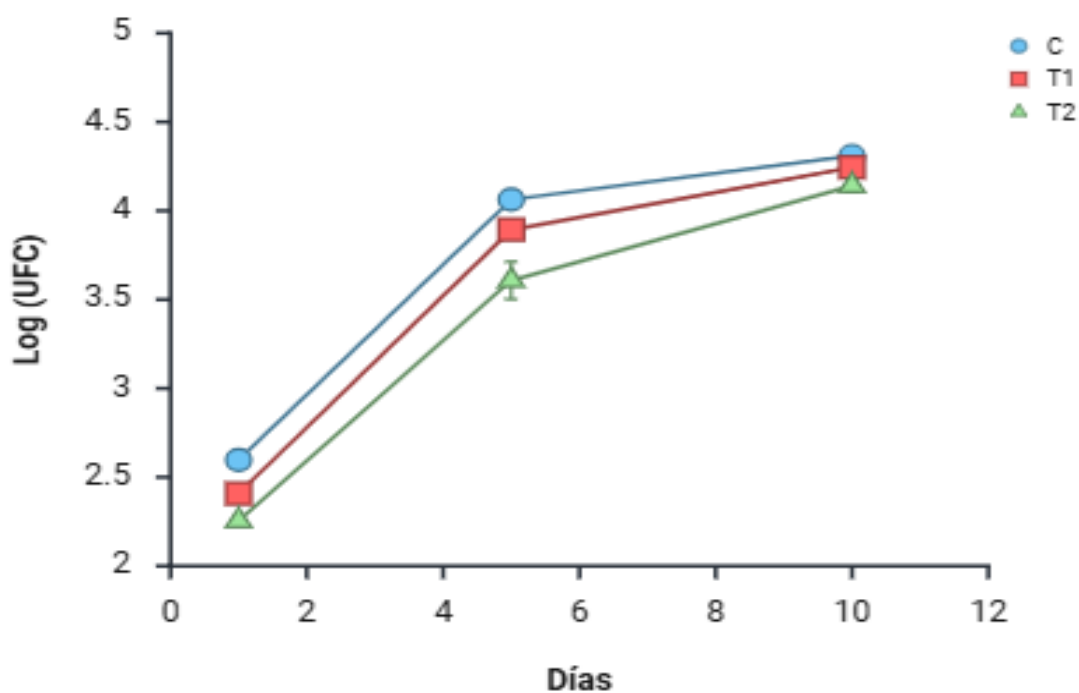
*Efecto de los sistemas de empaque sobre la carga de bacterias mesófilas aerobias (Log (UFC/g) en lomos de cerdos (Longissimus dorsi) a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.*

Polímero	Tiempo	Log (UFC/g) ± D.E.
Película transparente para alimento (Control)	Día 1	2.59 ± 0.04 <sup>c</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 5	4.06 ± 0.03 <sup>f</sup>
Película transparente para alimento (Control)	Día 10	4.30 ± 0.03 <sup>g</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 1	2.40 ± 0.04 <sup>b</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 5	3.89 ± 0.04 <sup>e</sup>
Quitosano, gelatina tipo B (T1)	Día 10	4.24 ± 0.03 <sup>g</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 1	2.25 ± 0.02 <sup>a</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 5	3.60 ± 0.10 <sup>d</sup>
Quitosano, Gelatina tipo B, nanopartículas de plata (T2)	Día 10	4.14 ± 0.03 <sup>f</sup>
C.V (%)		1.3930
R <sup>2</sup>		0.9974
P-valor (interacción)		0.0012

*Nota.* Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); D.E: Desviación estándar; C.V: Coeficiente de variación; R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación; P-valor: Probabilidad; <sup>a-g</sup>: Medias seguidas de letras distintas en cada fila indican diferencias entre los tratamientos (P < 0.05).

**Figura 6**

*Comportamiento de la carga de bacterias mesófilas aerobias (Log (UFC/g)) en lomos de cerdos (Longissimus dorsi) bajo el efecto de los sistemas de empaque evaluados a 1, 5 y 10 días de almacenamiento a 1 °C.*



*Nota.* C: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%).

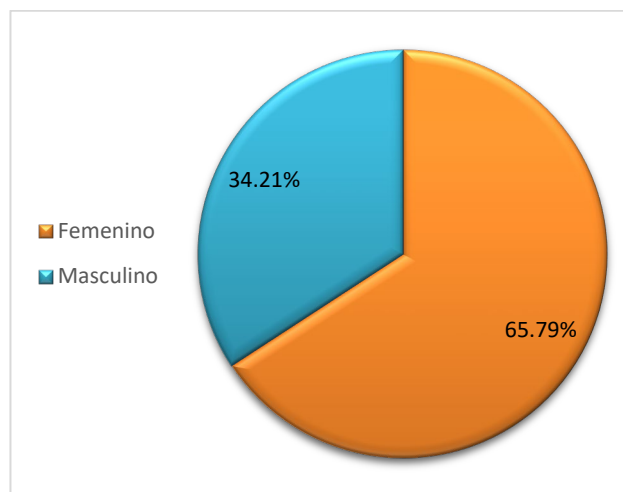
### **Aceptación por el consumidor**

Se obtuvieron las respuestas de un total de 38 encuestados, cuya muestra estuvo compuesta por un 65.79% de mujeres y un 34.21% de hombres (Figura 7), los cuales eran consumidores externos del Puesto de Ventas de Zamorano. El análisis de la frecuencia (Figura 8) de compra revela un patrón de consumo diverso, donde la categoría "1 vez/semana" y "2-3 veces/semana" comparten el porcentaje más alto (28.95% cada una), indicando que existe un grupo considerable de compradores ocasionales junto con otro grupo de compradores regulares. La frecuencia "Rara vez" representa el 26.32% de las respuestas, mientras que "Más de 3 veces/semana" es la menos frecuente con 15.79%.

Respecto a la cantidad de carne adquirida en cada acto de compra (Figura 9), se observa que la mayoría de los encuestados (55.26%) compra entre 1 y 3 libras por ocasión. El 23.68% adquiere entre 3 y 5 libras, el 13.16% compra únicamente 1 libra, y un 7.89% adquiere más de 5 libras en cada compra.

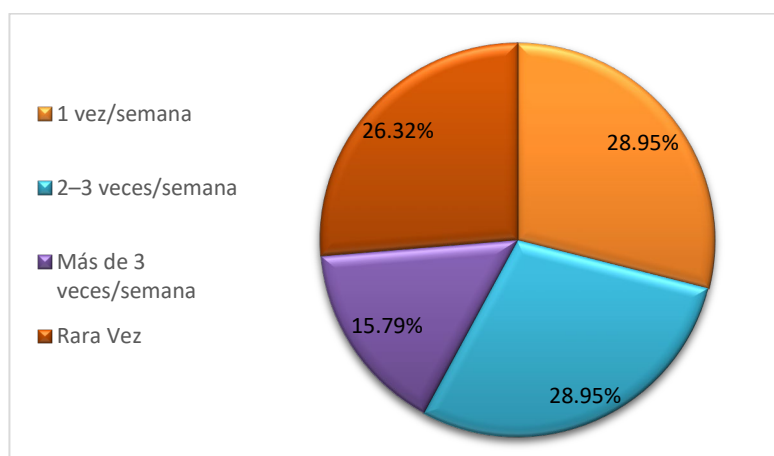
**Figura 7**

*Sexo de los clientes externos encuestados en el puesto de ventas de la Universidad Zamorano.*



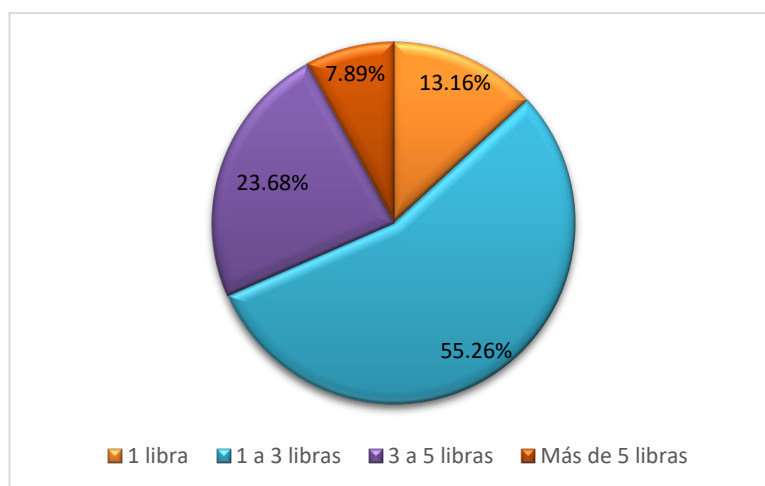
**Figura 8**

*Frecuencia de compra de los clientes externos encuestados en el puesto de ventas de la Universidad Zamorano.*



**Figura 9**

*Cantidad de carne comprada de los clientes externos encuestados en el puesto de ventas de la Universidad Zamorano.*



Los resultados obtenidos de las encuestas aplicadas demuestran diferencias significativas en la aceptación y preferencia de los empaques evaluados entre clientes externos. Los resultados del Cuadro 11, muestran la aceptación del biopolímero a base de quitosano y gelatina tipo B fue menor en comparación con el biopolímero enriquecido con nanopartículas de plata y el polietileno de baja densidad, los cuales mostraron resultados similares entre ellos dos. Esto sugiere que la modificación del biopolímero mediante la incorporación de nanopartículas de plata mejora sustancialmente su aceptación, equiparándola a la del empaque convencional.

Estos resultados se complementan con el análisis de preferencia por ranking (Cuadro 12), donde la prueba de Basker y Kramer evidencia una clara jerarquización de los tratamientos. La suma de categorías más alta correspondió al Tratamiento 1 (biopolímero simple), indicando que fue consistentemente rankeado como menos preferido. Las diferencias en las sumas de rangos entre el Control y el Tratamiento 1; asimismo entre el Tratamiento 2 y el Tratamiento 1, superaron el valor crítico (20.4), confirmando que el Tratamiento 1 es significativamente menos preferido en comparación con los otros dos empaques. Por el contrario, no existió diferencia significativa entre el Control y el Tratamiento 2 ( $13 < 20.4$ ), corroborando la equivalencia en preferencia entre el empaque

convencional y el biopolímero mejorado, coincidiendo con los resultados de aceptación del Cuadro 10. No obstante, a pesar de que no existió diferencia significativa entre el control y el tratamiento con nanopartícula de plata, esta última fue más elegida por los clientes. La Figura 10 proporciona propiedades cualitativas cruciales para interpretar estos resultados. Para el Tratamiento 2 (biopolímero con plata), los consumidores percibieron altamente atributos positivos como "se ve fresca" (65.8%) y "bien empacado" (60.5%). La percepción de seguridad ("Parece segura e higiénica") es un punto clave de la aceptación, y la adición de nanopartículas de plata, un agente antimicrobiano ampliamente validado, parece reforzar esta característica, alineándose con la creciente demanda de empaques "activos" que prolonguen la vida útil y garanticen la inocuidad (L. Wang et al., 2017), lo que explica su alta aceptación.

### Cuadro 11

*Aceptación de los empaques por clientes externos del puesto de venta de la Universidad Zamorano.*

Tratamiento	Aceptación $\pm$ D.E.
Tratamiento 1	4.97 $\pm$ 2.18
Tratamiento 2	6.78 $\pm$ 2.00
Control	6.34 $\pm$ 2.15

*Nota.* Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); T1: quitosano (33.75%) y gelatina tipo B (65%); T2: quitosano (33.25%), gelatina tipo B (64.5%) y nanopartículas de plata (1%); D.E: Desviación estándar.

### Cuadro 12

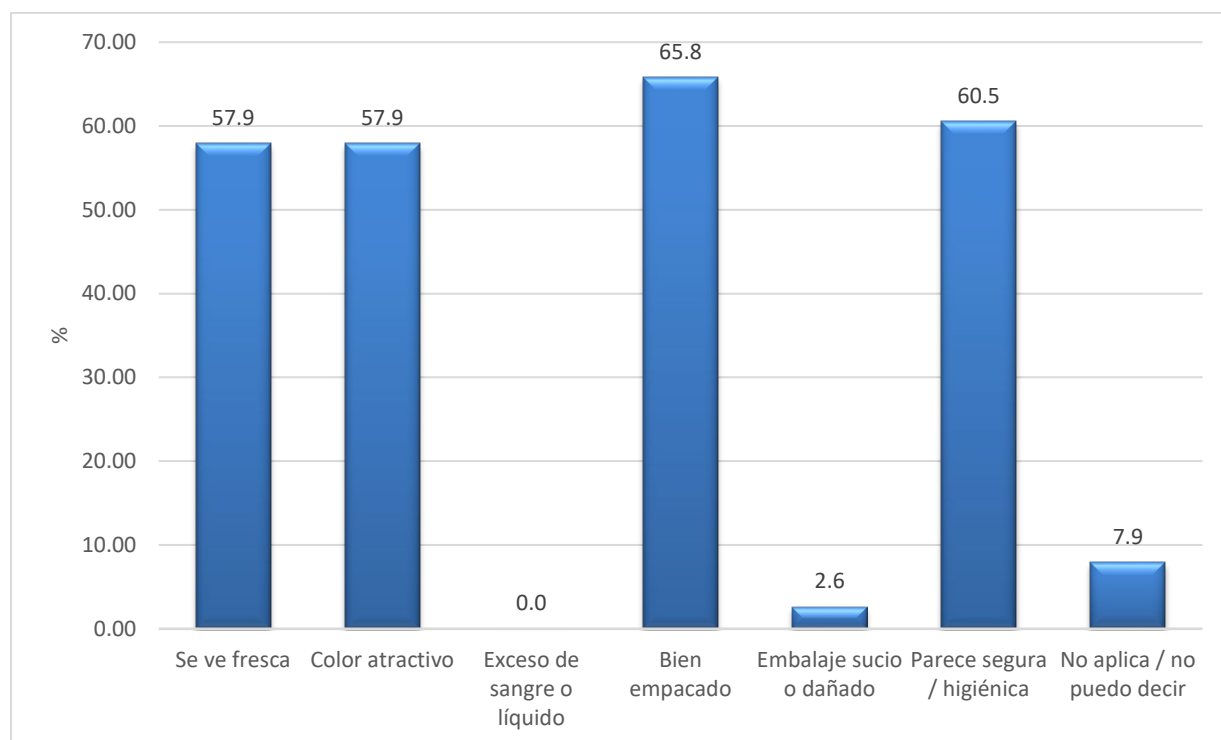
*Prueba de Basker y Kramer para la preferencia por ranking de los empaques por clientes externos del puesto de ventas de la Universidad Zamorano.*

Tratamientos	Control	Tratamiento 1	Tratamiento 2
<u>Suma de categorías</u>	70	101	57
Control	70	0	13
Tratamiento 1	101	31 <sup>*DS</sup>	44 <sup>*DS</sup>
Tratamiento 2	57	-13	-44 <sup>*DS</sup>
Valor crítico		20.4	

*Nota.* <sup>\*DS</sup>: Diferencia significativa. Control: Polímero de polietileno de baja densidad; T1: Biopolímero a base de quitosano y gelatina tipo B; T2: Biopolímero de quitosano, gelatina tipo B y nanopartículas de plata.

**Figura 10**

*Características percibidas por los consumidores en el tratamiento 2 (Biopolímero de quitosano, gelatina tipo B y nanopartículas de plata).*



### **Disposición a pagar**

Respecto a la disposición a pagar la distribución de las respuestas revela un panorama alentador para la implementación de empaques sostenibles. La pregunta realizada a los clientes fue:

**“Al saber que estos empaques son biodegradables, amigables con el ambiente y con uso de nanotecnología ¿pagaría más por este empaque?”**

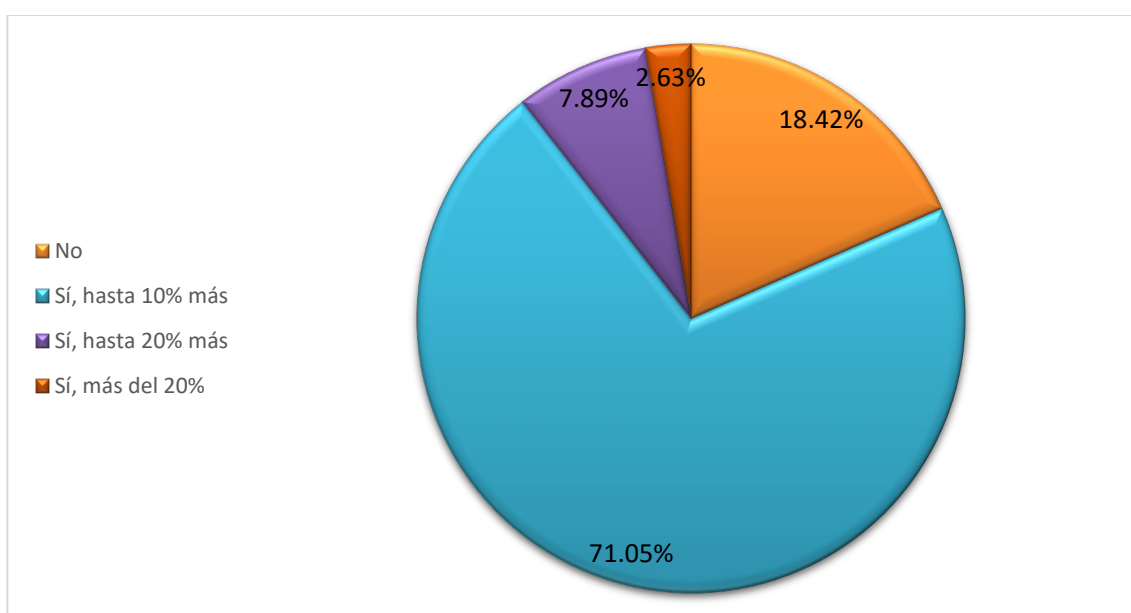
Los resultados (Figura 11) muestran que un 18.42% de los consumidores manifestó una negativa categórica (No) a pagar un precio adicional. Esta minoría podría estar influenciada por restricciones presupuestarias, escepticismo sobre los beneficios reales de la tecnología, o priorización de otros atributos del producto (Ketelsen et al., 2020).

La mayoría de los encuestados (71.05%) demostró diversos niveles de aceptación aquellos dispuestos a pagar hasta un 10% más. Este grupo probablemente valora la sostenibilidad, pero mantiene cierta sensibilidad al precio, representando el segmento objetivo más accesible para una estrategia de introducción inicial al mercado (Herrmann et al., 2022). Un 7.89% de los consumidores mostró una mayor valoración de estos atributos, declarando su disposición a pagar hasta un 20% más. Este segmento probablemente posee mayor conciencia ambiental, mayor poder adquisitivo, o una especial apreciación por la innovación tecnológica en productos de consumo (Testa et al., 2021; Magnier y Schoormans, 2015).

Asimismo, un 2.63% de encuestados demostró una extraordinaria valoración de estos beneficios, estando dispuestos a pagar más del 20% adicional. Este nicho de mercado, aunque menor en tamaño, representa una oportunidad para productos premium o especializados que enfatizen sus credenciales de sostenibilidad y tecnología avanzada.

**Figura 11.**

*Disponibilidad a pagar por empaques biodegradables, amigables con el ambiente y uso de nanotecnología de los clientes externos encuestados del puesto de ventas de la Universidad Zamorano.*



### Conclusiones

La combinación de quitosano y gelatina tipo B permitió obtener películas biodegradables con alta resistencia mecánica y una biodegradabilidad superior al 80 %, lo que valida su potencial como sustituto de plásticos convencionales.

El empaque con quitosano y gelatina tipo B mostró los mejores resultados en las propiedades físicas y mecánicas de los polímeros, no obstante, presentó una mayor solubilidad y PVA debido a la hidrofiliidad inherente de los materiales.

El empaque con nanopartículas de plata mostró el mejor desempeño en la conservación de lomos de cerdo (*Longissimus dorsi*), no obstante, afectó negativamente la estabilidad del color hacia el final del almacenamiento.

### Recomendaciones

Sustituir el uso de moldes de acetato en el proceso de casting por materiales con menor interacción superficial, como el polidimetilsiloxano (PDMS) u otro material de naturaleza hidrofóbica y flexible, para facilitar el desmoldeo de las películas, minimizando irregularidades en el espesor y mejorar la homogeneidad de la superficie.

Realizar pruebas de oxidación lipídica, como el índice TBA, y estudios de vida útil para evaluar de forma integral el efecto del empaque sobre la estabilidad y la calidad de la carne durante el almacenamiento.

Aumentar el número de encuestados en futuros estudios de aceptación y complementar el análisis con tecnologías como *eye-tracking*, para obtener información más precisa sobre la atención visual y la decisión de compra del consumidor.

### Referencias

- Aitboulahsen, M., El Galiou, O., Laglaoui, A., Bakkali, M. y Hassani Zerrouk, M. (2020). Effect of plasticizer type and essential oils on mechanical, physicochemical, and antimicrobial characteristics of gelatin, starch, and pectin-based films. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(6). <https://doi.org/10.1111/jfpp.14480>
- Alarcón Rojo, A. D., Gamboa Alvarado, J. G., Rodríguez Almeida, F. A., Grado Ahuir, J. A. y Janacua Vidales, H. (2006). Efecto de variables críticas del sacrificio sobre las propiedades fisicoquímicas de la carne de cerdo. <https://www.redalyc.org/pdf/613/61344105.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2002). *Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E0096-00E01>
- Awal, M. S., Benjakul, S., Prodpran, T. y Nilsuwan, K. (2025). Properties of Emulsion Co-Precipitated Collagen/Bambara Groundnut Protein-Based Film as Influenced by Basil Essential Oil and Soy Lecithin. *Polymers*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/polym17091139>
- Azeredo, H. M. C., Otoni, C. G., Corrêa, D. S., Assis, O. B. G., Moura, M. R. de y Mattoso, L. H. C. (2019). Nanostructured Antimicrobials in Food Packaging-Recent Advances. *Biotechnology Journal*, 14(12), e1900068. <https://doi.org/10.1002/biot.201900068>
- Bekhit, A. E.-D. A., Holman, B. W., Giteru, S. G. y Hopkins, D. L. (2021). Total volatile basic nitrogen (TVB-N) and its role in meat spoilage: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 280–302. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.006>
- Bekhit, A. E.-D. A., Hopkins, D. L., Fahri, F. T. y Ponnampalam, E. N. (2013). Oxidative Processes in Muscle Systems and Fresh Meat: Sources, Markers, and Remedies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 12(5), 565–597. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12027>
- Bermúdez-Oria, A., Rodríguez-Gutiérrez, G., Rubio-Senent, F., Fernández-Prior, Á. y Fernández-Bolaños, J. (2019). Effect of edible pectin-fish gelatin films containing the olive antioxidants hydroxytyrosol and 3,4-dihydroxyphenylglycol on beef meat during refrigerated storage. *Meat Science*, 148, 213–218. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.07.003>
- Cardoso, P. (2016). Nanopartículas de plata: obtención, utilización como antimicrobiano e impacto en el área de la salud, 58, 19–28. <http://revistapediatria.com.ar/wp-content/uploads/2016/04/260-Nanoparti%CC%81culas-de-plata.pdf>
- Chandarana, C., Bonde, S., Sonwane, S. y Prajapati, B. (2025). Chitosan-based packaging: leading sustainable advancements in the food industry. *Polymer Bulletin*, 82(11), 5431–5462. <https://doi.org/10.1007/s00289-025-05775-7>
- Chen, Y.-C., Weng, C.-H., Huang, S.-M., Wolde, G. S., Huang, J.-W., Chokejaroenrat, C., Apiladda, P. y Lin, Y.-T. (2025). Multifunctional chitosan-based bioactive films incorporated with Jaboticaba pomace extract for sustainable pork preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 322(Pt 1), 146439. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146439>
- Cruz-Monterrosa, R. G., Reséndiz-Cruz, V., Landa-Salgado, P., Jiménez-Guzmán, J., Díaz-Ramírez, M., La Miranda-De Lama, G., Rayas-Amor, A. A. y García-Garibay J.M. (2017). *Nanotecnología en la industria alimentaria. Nanopartículas usadas en la conservación de la carne | Agro Productividad*. <https://mail.revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/90>

- Díaz Alejandro, A. M. (2021). *Elaboración y caracterización fisicoquímica de una película biodegradable utilizando harina de cáscara de plátano (Musa paradisiaca L.)* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://share.google/3EpXmcs1hqfLQOV96>
- Djagny, V. B., Wang, Z. y Xu, S. (2001). Gelatin: A valuable protein for food and pharmaceutical industries: Review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 41(6), 481–492. <https://doi.org/10.1080/20014091091904>
- Ertbjerg, P. (2022). Current understanding on the role of proteolysis on meat quality. En *New Aspects of Meat Quality* (pp. 95–114). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-85879-3.00022-2>
- Flórez, M., Guerra-Rodríguez, E., Cazón, P. y Vázquez, M. (2022). Chitosan for food packaging: Recent advances in active and intelligent films. *Food Hydrocolloids*, 124, 107328. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107328>
- Geueke, B., Groh, K. y Muncke, J. (2018). Food packaging in the circular economy: Overview of chemical safety aspects for commonly used materials. *Journal of Cleaner Production*, 193, 491–505. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.005>
- Giraldo, J. D. (2015). *Propiedades, obtención, caracterización y aplicaciones del quitosano* (Advances in Food and Nutrition Research). <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3350.9287>
- Gómez-Estaca, J., Gómez-Guillén, M. C., Fernández-Martín, F. y Montero, P. (2011). Effects of gelatin origin, bovine-hide and tuna-skin, on the properties of compound gelatin–chitosan films. *Food Hydrocolloids*, 25(6), 1461–1469. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.01.007>
- González López, D.M., Chamorro Ramírez, F. H., Bustos Martínez J.A., Schettino Bermúdez B.S. y Hamdan Partida A. (2021). Efecto microbiológico y fisicoquímico en carne de cerdo recubierta con películas de nanopartículas de plata. *Avances De Investigación En Inocuidad De Alimentos*, 4(7). <https://e-gnosis.udg.mx/index.php/inocuidad/article/view/249>
- González Teo, L. J. (2022). *Efecto del uso de hidrocloreto de ractopamina y compuestos orgánicos en la etapa de finalización de cerdos sobre los indicadores productivos en la canal y parámetros de calidad de carne* [Proyecto especial de graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/dc7b5317-01d4-408f-81cf-38b51ca6d1a3/download>
- Hafsa, J., Smach, M. a., Ben Khedher, M. R., Charfeddine, B., Limem, K., Majdoub, H. y Rouatbi, S. (2016). Physical, antioxidant and antimicrobial properties of chitosan films containing Eucalyptus globulus essential oil. *LWT - Food Science and Technology*, 68, 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.12.050>
- Haghighi, H., Leo, R. de, Bedin, E., Pfeifer, F., Siesler, H. W. y Pulvirenti, A. (2019). Comparative analysis of blend and bilayer films based on chitosan and gelatin enriched with LAE (lauroyl arginate ethyl) with antimicrobial activity for food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, 19, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.015>
- Haghighi, H., Leugoue, S. K., Pfeifer, F., Siesler, H. W., Licciardello, F., Fava, P. y Pulvirenti, A. (2020). Development of antimicrobial films based on chitosan-polyvinyl alcohol blend enriched with

- ethyl lauroyl arginate (LAE) for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, *100*, 105419. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105419>
- Haghighi, H., Licciardello, F., Fava, P., Siesler, H. W. y Pulvirenti, A. (2020). Recent advances on chitosan-based films for sustainable food packaging applications. *Food Packaging and Shelf Life*, *26*, 100551. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2020.100551>
- Haghighi-Manesh, S. y Azizi, M. H. (2017). Active packaging systems with emphasis on its applications in dairy products. *Journal of Food Process Engineering*, *40*(5), Artículo e12542. <https://doi.org/10.1111/jfpe.12542>
- Helmy, E. (2016). Nano-biotechnology breakthrough and food-packing industry- A Review. *Microbial Biosystems*, *1*(1), 50–69. <https://doi.org/10.21608/mb.2016.5257>
- Herrmann, C., Rhein, S. y Sträter, K. F. (2022). Consumers' sustainability-related perception of and willingness-to-pay for food packaging alternatives. *Resources, Conservation and Recycling*, *181*, 106219. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106219>
- Hu, D., Gao, T., Kong, X., Ma, N., Fu, J., Meng, L., Duan, X., Hu, C. Y., Chen, W., Feng, Z. y Latif, S. (2022). Ginger (*Zingiber officinale*) extract mediated green synthesis of silver nanoparticles and evaluation of their antioxidant activity and potential catalytic reduction activities with Direct Blue 15 or Direct Orange 26. *PLoS One*, *17*(8), e0271408. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0271408>
- Huang, X. y Ahn, D. U. (2019). Lipid oxidation and its implications to meat quality and human health. *Food Science and Biotechnology*, *28*(5), 1275–1285. <https://doi.org/10.1007/s10068-019-00631-7>
- Huff-Lonergan, E. y Lonergan, S. M. (2005). Mechanisms of water-holding capacity of meat: The role of postmortem biochemical and structural changes. *Meat Science*, *71*(1), 194–204. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2005.04.022>
- Johnson, L. G., Zhai, C., Reeve, L. M., Prusa, K. J., Nair, M. N., Huff-Lonergan, E. y Lonergan, S. M. (2023). Characterizing the sarcoplasmic proteome of aged pork chops classified by purge loss. *Journal of Animal Science*, *101*. <https://doi.org/10.1093/jas/skad046>
- Ketelsen, M., Janssen, M. y Hamm, U. (2020). Consumers' response to environmentally-friendly food packaging - A systematic review. *Journal of Cleaner Production*, *254*, 120123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120123>
- Kumar, S., Mudai, A., Roy, B., Basumatary, I. B., Mukherjee, A. y Dutta, J. (2020). Biodegradable Hybrid Nanocomposite of Chitosan/Gelatin and Green Synthesized Zinc Oxide Nanoparticles for Food Packaging. *Foods (Basel, Switzerland)*, *9*(9). <https://doi.org/10.3390/foods9091143>
- Kumar, S., Ye, F., Dobretsov, S. y Dutta, J. (2019). Chitosan Nanocomposite Coatings for Food, Paints, and Water Treatment Applications. *Applied Sciences*, *9*(12), 2409. <https://doi.org/10.3390/app9122409>
- Lago, M. A., Sendón, R., Quirós, A. R.-B. de, Sanches-Silva, A., Costa, H. S., Sánchez-Machado, D. I., Valdez, H. S., Angulo, I., Aurrekoetxea, G. P., Torrieri, E., López-Cervantes, J. y Paseiro, P. (2014). Preparation and Characterization of Antimicrobial Films Based on Chitosan for Active Food Packaging Applications. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(10), 2932–2941. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1276-z>

- Latimer, G. W. (2012). *Official Methods of Analysis of AOAC International*. <https://www.aoac.org/official-methods-of-analysis/>
- Li, S., Wang, Y [Yajie], Xue, Z., Jia, Y., Li, R., He, C. y Chen, H. (2021). The structure-mechanism relationship and mode of actions of antimicrobial peptides: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 109, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.005>
- López, O. V [O. V.], Versino, F., Villar, M. A [M. A.] y García, M. A [M. A.] (2015). Agro-industrial residue from starch extraction of *Pachyrhizus ahipa* as filler of thermoplastic corn starch films. *Carbohydrate Polymers*, 134, 324–332. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.07.081>
- López, O. V [Olivia Valeria], Castillo, L. A., Farenzena, S., Pintos, E., Rodríguez, M. S., García, M. A [María Alejandra] y Villar, M. A [Marcelo Armando] (2018). Película biodegradable de almidón de maíz termoplástico y quitosano con actividad antimicrobiana empleada como envase activo. *Matéria (Rio De Janeiro)*, 23(2). <https://doi.org/10.1590/s1517-707620180002.0423>
- Luo, X., Peng, Y., Qin, Z., Tang, W., Duns, G. J., Dessie, W., He, N. y Tan, Y. (2023). Chitosan-based packaging films with an integrated antimicrobial peptide: Characterization, in vitro release and application to fresh pork preservation. *International Journal of Biological Macromolecules*, 231, 123209. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123209>
- Magnier, L. y Schoormans, J. (2015). Consumer reactions to sustainable packaging: The interplay of visual appearance, verbal claim and environmental concern. *Journal of Environmental Psychology*, 44, 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2015.09.005>
- Nasution, H., Harahap, H., Julianti, E., Safitri, A. y Jaafar, M. (2024). Properties of active packaging of PLA-PCL film integrated with chitosan as an antibacterial agent and *syzygium cumini* seed extract as an antioxidant agent. *Heliyon*, 10(1), e23952. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23952>
- Ngo, D.-H. y Kim, S.-K. (2014). Antioxidant Effects of Chitin, Chitosan, and Their Derivatives. En *Advances in Food and Nutrition Research. Marine Carbohydrates: Fundamentals and Applications, Part B* (Vol. 73, pp. 15–31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800268-1.00002-0>
- Ojeda Asensio, D. (2014). *Estudio de la liberación de plata desde recipientes de plástico de uso alimentario con nanopartículas de plata mediante el uso de algas como biosensores - Repositorio Institucional de Documentos* [Trabajo fin de grado, Universidad de Zaragoza]. [zaguan.unizar.es](http://zaguan.unizar.es). <https://zaguan.unizar.es/record/16946?ln=es#>
- Ortega, F. (2021). *Materiales biodegradables con nanopartículas de plata con capacidad antimicrobiana para mejorar los procesos de conservación de alimentos*. <https://doi.org/10.35537/10915/131799>
- Quintanilla, T. (2016). *Efecto de recubrimiento a base de gelatina de colágeno durante el almacenamiento del músculo semitendinosus de res, en dos tipos de empaque* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras. <https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/5839>
- Quintero Zavala, A. (2018). *Nanotecnología en la industria de los alimentos*. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro; Saltillo, Coahuila, México. <https://oai.uaaan.mx/handle/123456789/45229>

- Rachtanapun, P., Rachtanapun, C., Jantrawut, P., Thanakkasaranee, S., Kasi, G., Tantala, J., Panraksa, P. y Chaiwarit, T. (2024). Carboxymethyl Chitosan-Based Materials in Packaging, Food, Pharmaceutical, and Cosmetics. En R. Jayakumar (Ed.), *Advances in Polymer Science. Multifaceted Carboxymethyl Chitosan Derivatives: Properties and Biomedical Applications* (Vol. 292, pp. 139–203). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/12\\_2023\\_158](https://doi.org/10.1007/12_2023_158)
- Ranjan, S., Dasgupta, N. y Lichtfouse, E. (Eds.). (2016). *Nanoscience in Food and Agriculture 1. Sustainable Agriculture Reviews*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-39303-2>
- Rivero, S., García, M. A [M. A.] y Pinotti, A. (2010). Crosslinking capacity of tannic acid in plasticized chitosan films. *Carbohydrate Polymers*, 82(2), 270–276. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.04.048>
- Rodriguez, K. y Andino, P. *Elaboración de una película a partir de quitosano extraído de exuvia de Hermetia illucens reforzada con aceite esencial de romero como agente antimicrobiano* [Proyecto Especial de Graduación]. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/e683bcb3-8f02-43d5-b081-809ffdddb3b2/content>
- Saidi, L., Wang, Y [Yong], Wich, P. R. y Selomulya, C. (2025). Polysaccharide-based edible films — strategies to minimize water vapor permeability. *Current Opinion in Food Science*, 61, 101258. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2024.101258>
- Sánchez Moreno, M. (2017). *Nanopartículas de plata: preparación, caracterización y propiedades con aplicación en inocuidad de los alimentos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Facultad de Ciencias. Departamento de Química Inorgánica y Química Técnica. <https://e-spacio.uned.es/entities/publication/5a736b90-fdb8-4d31-9750-2ecd0836ef0b/full>
- Schmidt, S. y Laner, D. (2023). The environmental performance of plastic packaging waste management in Germany: Current and future key factors. *Journal of Industrial Ecology*, 27(6), 1447–1460. <https://doi.org/10.1111/jiec.13411>
- Sirelkhatim, A., Mahmud, S., Seeni, A., Kaus, N. H. M., Ann, L. C., Bakhori, S. K. M., Hasan, H. y Mohamad, D. (2015). Review on Zinc Oxide Nanoparticles: Antibacterial Activity and Toxicity Mechanism. *Nano-Micro Letters*, 7(3), 219–242. <https://doi.org/10.1007/s40820-015-0040-x>
- Testa, F., Di Iorio, V., Cerri, J. y Pretner, G. (2021). Five shades of plastic in food: Which potentially circular packaging solutions are Italian consumers more sensitive to. *Resources, Conservation and Recycling*, 173, 105726. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105726>
- Valenzuela V., C. y Arias, J. I. (2012). Potenciales aplicaciones de películas de quitosano en alimentos de origen animal: una revisión. *Avances En Ciencias Veterinarias*, 27(1). <https://doi.org/10.5354/0716-260x.2012.21997>
- Vazquez-Muñoz, R., Avalos-Borja, M. y Castro-Longoria, E. (2014). Ultrastructural analysis of *Candida albicans* when exposed to silver nanoparticles. *PloS One*, 9(10), e108876. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0108876>
- Vicenteni, N. M. (2003). *Preparation and characterization of edible films based on cassava starch for post-harvest use* [Tesis]. Universidad Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Fevereiro.

<https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/2accdbd-3ee8-455b-8b04-c5bcf933c8ad/content>

- Wang, H [Hongxia], Qian, J. y Ding, F. (2018). Emerging Chitosan-Based Films for Food Packaging Applications. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(2), 395–413. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b04528>
- Wang, J., Yang, P., Han, D., Huang, F., Li, X., Song, Y., Wang, H [Hang], Liu, J., Zheng, J. y Zhang, C. (2022). Role of Intramuscular Connective Tissue in Water Holding Capacity of Porcine Muscles. *Foods (Basel, Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/foods11233835>
- Wang, L., Hu, C. y Shao, L. (2017). The antimicrobial activity of nanoparticles: Present situation and prospects for the future. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 1227–1249. <https://doi.org/10.2147/ijn.s121956>
- Watanabe, G., Motoyama, M., Nakajima, I. y Sasaki, K. (2018). Relationship between water-holding capacity and intramuscular fat content in Japanese commercial pork loin. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 31(6), 914–918. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0640>

## Anexos

## Anexo A

*Encuesta aplicada para el sensorial visual de empaques en el puesto de ventas Zamorano*

## Sensorial visual de empaques

A continuación verá una serie de fotografías de empaques de carne. Mire cada imagen y responda según lo que perciba visualmente. No hay respuestas correctas: nos interesa su opinión honesta

quiranabdias@gmail.com [Cambiar cuenta](#)



No compartido

\* Indica que la pregunta es obligatoria

### Datos del participante

A continuación se debe llenar las preguntas con su información

Edad \*

Tu respuesta

Sexo \*

M

F

¿Usted compra y/o cocina carne en casa? \*

Sí

No



¿Con qué frecuencia compra carne fresca? \*

- Nunca
- Rara Vez
- 1 vez/semana
- 2-3 veces/semana
- Más de 3 veces/semana

¿Cuánta carne adquiere cada vez que compran carne? \*

- 1 libra
- 1 a 3 libras
- 3 a 5 libras
- Más de 5 libras



### Sensorial visual de empaque

A continuación verá una serie de fotografías de empaques de carne. Mire cada imagen y responda según lo que perciba visualmente. No hay respuestas correctas: nos interesa su opinión honesta

¿Cuánto le gusta visualmente este empaque? \*

(1 = No me gusta nada; 3 = No me gusta; 5 = Ni me gusta, ni me disgusta; 7 = Me gusta; 9 = Me gusta muchísimo)

**365**



**272**



**414**



1

2

3

4

5

6

7

8

9

365

272

414



Marque los atributos que describen la foto (Seleccione a todos los que aplica)

**365**



**272**



**414**



	365	272	414
Se ve fresca	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Color atractivo	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Exceso de sangre o líquido	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bien empacado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Embalaje sucio o dañado	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Parece segura / higiénica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
No aplica / no puedo decir	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ordene las fotos según su preferencia \*

**365**



**272**



**414**



365

272

414

1




2




3





Al saber que estos empaques son biodegradables, amigables con el ambiente y con uso de nanotecnología, ¿Pagaría más por este empaque? \*

**365**



**272**



**414**



- Sí, hasta 10% más
- Sí, hasta 20% más
- Sí, más del 20%
- No

Atrás

Enviar

Borrar formulario



**Anexo B***Costos de producción de las biopelículas*

Costo Unitario	Tratamiento 1	Tratamiento 2	Control
Gelatina tipo B	\$ 0.03	\$ 0.03	---
Qitosano	\$ 0.03	\$ 0.03	---
Glicerol	\$ 0.08	\$ 0.08	---
Ácido acético	\$ 0.02	\$ 0.02	---
Nanopartícula de plata	---	\$ 0.04	---
Total	\$ 0.15	\$ 0.19	\$ 0.09